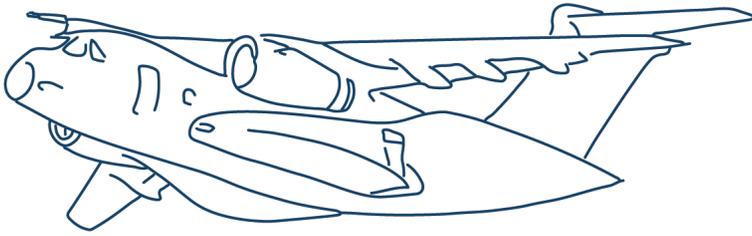


Desenvolvimento e Gerenciamento dos Fatores de Confiabilidade, Disponibilidade e Manutenibilidade de Sistemas Aeroespaciais Complexos

Claudio Stacheira
Fernando Abrahão
Henrique Marques
Guilherme Rocha
Celio Mesquita
Organizadores





**Desenvolvimento e Gerenciamento
dos Fatores de Confiabilidade,
Disponibilidade e Manutenibilidade de
Sistemas Aeroespaciais Complexos**

**Presidente**

Antonio Cruvinel Borges Neto (Reitor)

Vice-Presidente

Claudio Roberto Stacheira (Pró-Reitor de Pesquisa e Pós-Graduação)

Coordenadora Geral

Elisabete Tomomi Kowata

Assessor

Patrick Di Almeida Vieira Zechin

Analista de Gestão Governamental - Biblioteconomia

Andressa de Oliveira Sussai

Revisão Técnica

Patrick Di Almeida Vieira Zechin

Revisão Geral e Linguística em Português

Feeling Propaganda Ltda

Projeto Gráfico e Editoração

Feeling Propaganda Ltda

Conselho Editorial

Adolfo José de Souza Andre (UEG-IAEL)

Daniel Blamires (UEG-IACSB)

Juliano Rodrigues da Silva (UEG-IACT)

Maisa Borges Costa (UEG-IACT)

Raphaela Christina Costa Gomes (UEG-IACAS)

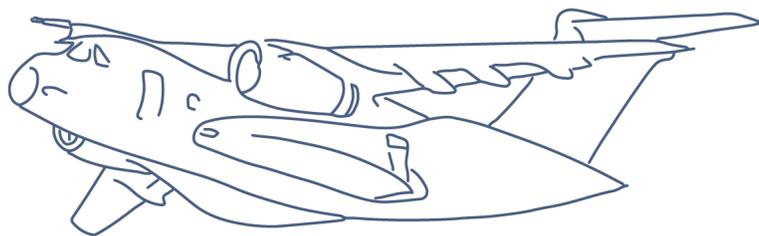
Renata Carvalho dos Santos (UEG-IACSB)

Roseli Vieira Pires (UEG-IACSA)

Sebastião Avelino Neto (UEG-IACAS)

Sônia Bessa da Costa Nicácio Silva (UEG-IAEL)

Thiago Henrique Costa Silva (UEG-IACSA)



**Desenvolvimento e Gerenciamento
dos Fatores de Confiabilidade,
Disponibilidade e Manutenibilidade de
Sistemas Aeroespaciais Complexos**



**Anapolis/GO
2024**

© 2024, Editora UEG

PROIBIDA A VENDA E REVENDA.

A reprodução não autorizada desta publicação, por qualquer meio, seja total ou parcial, constitui violação da Lei no 9.610/98.

Catlogação na Fonte
Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Universidade Estadual de Goiás, Anápolis, GO, Brasil)

D451 Desenvolvimento e gerenciamento dos fatores de confiabilidade, disponibilidade e manutenibilidade de sistemas aeroespaciais complexos / Organizado por: Claudio Stacheira *et al.* – 1. ed. – Anápolis - GO : Editora UEG, 2024.

330 p. ; il.; 16 x 22,5 cm

ISBN: 978-65-88502-68-6 (e-book)

ISBN: 978-65-88502-70-9 (impresso)

1. Suportabilidade de sistemas aeroespaciais. 2. Gestão de manutenção de aeronaves. 3. Otimização logística e modelagem de sistemas. 4. Tecnologias e algoritmos para defesa e aeronáutica. 5. Gestão de processos. I. Mesquita, Célio, org. II. Stacheira, Claudio, org. III. Abrahão, Fernando Teixeira Mendes, org. IV. Marques, Henrique, org. V. Rocha, Guilherme Conceição, org. VI. Mesquita, Antônio Célio Pereira de, org. VII. Título.

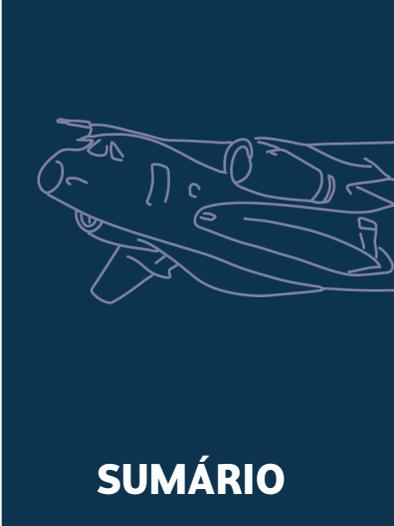
CDU: 004.451.2:629.7

Andressa de Oliveira Sussai – CRB 1 / 3032

Esta obra é em formato de e-Book e foi financiada com recursos próprios da Universidade Estadual de Goiás - Processo SEI n. 202200020011455. O suporte impresso desta obra é parte do projeto "Fortalecimento da Cooperação ITA x UEG no âmbito do Grupo de Pesquisa em Desenvolvimento e Tecnologias Aplicadas – Gedetec e Laboratório de Tecnologia em Sistemas, Produção e Logística – Teclog", da Universidade Estadual de Goiás - UEG, financiado com recursos de emenda parlamentar do Deputado Estadual Amilton Filho – Processo SEI n. 202300020009711. A exatidão das referências, a revisão gramatical e as ideias expressas e/ou defendidas nos textos são de inteira responsabilidade dos autores.



EDITORA UNIVERSIDADE ESTADUAL DE GOIÁS
BR-153 – Quadra Área – CEP: 75.132-903
Fone: (62) 3328-4866 – Anápolis-GO
www.editora.ueg.br / e-mail: editora@ueg.br



SUMÁRIO

Apresentação.....	11
Parte 1 - Caracterização Conceitual.....	15
O problema de suportabilidade para sistemas aeroespaciais complexos.....	17
Conceitos de confiabilidade, disponibilidade, manutenibilidade e segurança (do inglês <i>reliability, availability, maintainability and safety</i> - RAMS)	35
Pesquisa operacional e problemas de suportabilidade	45
Parte 2 - Desenvolvimento da Suportabilidade	71
Ferramenta para o desenvolvimento do suporte integrado do produto para sistemas aeroespaciais complexos: gêmeo digital embrionário	73
O problema de alocação e empacotamento de tarefas de manutenção	83
Modelo para recomendações no tratamento de itens do tipo “rogue”	108

Modelagem da suportabilidade e simulação de cenários operacionais como ferramentas para o desenvolvimento de sistemas complexos..... 131

Modelo de referência para avaliação de suportabilidade em aquisições de sistemas complexos de defesa, inspirado no conceito de gêmeos digitais154

Análise do Plano do Processo de Certificação Aeronáutica Sincronizado ao Desenvolvimento do Plano Integrado de Suporte do Produto.....165

Parte 3 - Gerenciamento da Frota 189

Uma abordagem de gerenciamento da manutenção de frota de aeronaves de defesa baseada em modelo de otimização de duas etapas 191

Modelo de Avaliação dos Impactos de Fatores Logísticos na Suportabilidade de Aeronaves de Defesa217

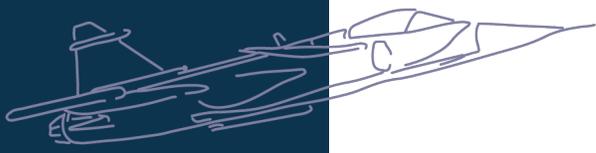
Otimização da alocação de frota de aeronaves e investimento em estoque, utilizando informações logísticas individualizadas de cada aeronave.....253

Um modelo para o gerenciamento de frotas de aeronaves militares baseado na integração ótima entre manutenções preditiva e programada..... 261

Parte 4 - Resumos de pesquisas relacionadas, desenvolvidas pelo AeroLogLab-ITA e em parceria com o Instituto de Logística da Aeronáutica - ILA.....293

Aplicação de algoritmo genético e programação de metas no problema de planejamento de manutenção de aeronaves militares295

Aplicação de conceitos de engenharia de suportabilidade no ciclo de vida de usinas de geração de energia fotovoltaica.....	297
O problema de roteamento de aeronaves e manutenção para frotas fracioanadas com a inclusão de informações de prognósticos e de gerenciamento de saúde	299
Modernização de meia vida de aeronaves militares: uma definição da melhor política sob a perspectiva do decisor	301
Processo de seleção de componentes aeronáuticos candidatos a impressão 3D para reparos de danos de combate em aeronaves.....	303
Conceitos de Engenharia Logística aplicados à Operação de Lançamento de Veículos Sub Orbitais.....	305
Modelagem multiobjetivo para dimensionamento de recursos em suporte a operações de fiscalização em fronteiras	307
Isolamento de falhas em sistemas de navegação inercial com redundância mínima por meio de sensores auxiliares	309
Método híbrido para diagnóstico de falha aplicado a um modelo de trem de pouso.....	311
Modelo de aprendizado de máquina para validação de dados de defeito das aeronaves T-27	313
Avaliação da alteração do programa de manutenção das aeronaves A-29 da força aérea brasileira.....	315
Comparação de custos entre contratos de logística baseada em desempenho e contratos de serviços sob demanda - modelagem, otimização e simulação com ferramentas <i>opus suíte</i>	317
Sobre os organizadores	319
Sobre os/as autores/as.....	323



APRESENTAÇÃO

Este livro é fruto do trabalho do Laboratório de Engenharia Logística - AeroLogLab, do Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA, e de sua parceria com o Grupo de Pesquisa em Desenvolvimento e Tecnologias Aplicadas - Gedetec, da Universidade Estadual de Goiás - UEG.

Ele reúne os principais resultados do projeto Desenvolvimento do Suporte Logístico Integrado para as aeronaves de Defesa Embraer KC-390 e Saab Gripen, coordenado pelo AeroLogLab-ITA e tendo o Gedetec-UEG como participante. A iniciativa foi viabilizada com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES, a partir do Programa de Apoio ao Ensino e à Pesquisa Científica e Tecnológica em Defesa Nacional - PRODEFESA-IV. Na UEG, soma-se a outras duas ações estratégicas: projeto Estruturação da unidade de pesquisa e tecnologia em simulação por realidade virtual e mista, do Laboratório de Tecnologia em Sistemas, Produção e Logística - Teclog, apoiada pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, e projeto Fortalecimento da Cooperação ITA x UEG no âmbito do Gedetec e Teclog, com fomento institucional desta Universidade via recurso financeiro de emenda parlamentar destinada pelo Deputado Estadual de Goiás, Amilton Filho.

As produções aqui contidas inserem-se nas áreas de Engenharia Logística e Engenharia de Suportabilidade de Sistemas Complexos de Defesa/Sistemas Aeroespaciais Complexos. Consideram especialmente o contexto das frotas das aeronaves KC-390 e F-39 da Força Aérea Brasileira - FAB, cruciais para a segurança, a soberania e o desenvolvimento do Brasil.

Os textos estão organizados em quatro partes: Caracterização conceitual, Desenvolvimento da suportabilidade, Gerenciamento da frota e Pesquisas relacionadas desenvolvidas pelo AeroLogLab-ITA e em parceria com o Instituto de Logística da Aeronáutica - ILA.

Na primeira parte, os trabalhos abordam a descrição do problema da suportabilidade e sua caracterização no ciclo de vida de sistemas aeroespaciais complexos, os conceitos de confiabilidade, disponibilidade, manutenibilidade e segurança, assim como o enfoque da pesquisa operacional aplicada a problemas de suportabilidade. Na segunda, os trabalhos concentram-se em processos, tarefas e na modelagem do desenvolvimento das características de suportabilidade, com ênfase nas fases iniciais do ciclo de vida desses sistemas. Na terceira parte, os trabalhos abordam os processos, tarefas e a modelagem do gerenciamento das características de suportabilidade durante a fase de operação e suporte prevista no ciclo de vida. Na quarta e última parte, o livro apresenta um rol de resumos de pesquisas afins, geradas dentro do AeroLogLab-ITA e em parceria com o Instituto de Logística da Aeronáutica – ILA, cujo conteúdo completo pode ser acessado em formato eletrônico no website do AeroLogLab-ITA, pela internet.

Como coletânea das produções de um conjunto de pesquisadores envolvidos no projeto, o conteúdo exemplifica o enfoque e a convergência do trabalho do AeroLogLab-ITA e do Gedetec-UEG: caracterização, estudo e prospecção de competências de interesse do ciclo de vida de sistemas complexos.

Considerando que a Engenharia Logística e a Engenharia de Suportabilidade de sistemas aeroespaciais complexos, alcançam um domínio interdisciplinar do conhecimento, o livro possui potencial para contribuir com o transbordamento de perspectivas, conceitos, ferramentas e aplicações aos diferentes contextos em que se apliquem a visão e o aspecto da engenharia e gestão de sistemas complexos. Essa perspectiva fundamenta a cooperação entre o AeroLogLab-ITA e o Gedetec-UEG, propondo-se a contribuir com processos e projetos de desenvolvimento e suportabilidade de sistemas complexos, em suas dimensões organizacional, operacional, institucional e produtiva. Ela alcança um espectro mais amplo de competências, com o objetivo de oferecer um olhar expandido sobre competências em sistemas complexos, a partir desta e de iniciativas contínuas de colaboração em ensino, pesquisa, extensão e desenvolvimento científico e tecnológico.

A organização deste livro também é produto de meu estágio pós-doutoral no ITA, no Programa de Pós-graduação em Ciências e Tecnologias Espaciais – Gestão, supervisionado pelo Prof. Dr. Fernando Teixeira Mendes Abrahão, Coronel R1 da Força Aérea Brasileira e Chefe do AeroLogLab-ITA. Em conjunto com esse estágio, a estruturação física do Teclog vinculado ao Gedetec-UEG e a inserção da área de pesquisa alinhamento entre estratégias e competências em sistemas complexos no Programa de Pós-Graduação em Gestão, Educação e Tecnologias – PPGET, da UEG, completam o processo de implantação do Núcleo do AeroLogLab-ITA na Universidade Estadual de Goiás, tal como previsto no projeto.

O estabelecimento da parceria entre o ITA e a UEG e o consequente envolvimento do Gedetec com o AeroLogLab-ITA são resultados da mobilização e da ação prospectiva do Comitê da Indústria de Defesa e Segurança de Goiás (COMDEFESA - GO),

em especial a partir de seu Presidente Anastácios Apóstolos Dágios e do Coronel R1 da Força Aérea Brasileira, Cícero Ceccatto, que impulsionaram o caminho para essa relação. A partir dela, o AeroLogLab-ITA e o Gedetec-UEG esperam contribuir para a produção científica e tecnológica, para o avanço da fronteira do conhecimento e para a formação continuada em nível superior e técnico de profissionais com atuação em sistemas complexos de interesse de defesa. Essa perspectiva extrapola o conjunto de organizações militares envolvidas diretamente com o assunto defesa, alcançando a visão de desenvolvimento e soberania nacional tal qual previsto na Política Nacional de Defesa e na Estratégia Nacional de Defesa, com destaque para a Base Industrial de Defesa (BID). Por isso, o oferecimento desta obra à comunidade acadêmica, ao Estado, ao setor empresarial e à sociedade é um passo importante da cooperação entre o ITA e a UEG e do mútuo objetivo entre as duas instituições envolvidas.

Anápolis, Goiás, verão de 2024.

Claudio Stacheira

Gedetec-UEG

claudio@ueg.br

PARTE 1

**CARACTERIZAÇÃO
CONCEITUAL**

O problema de suportabilidade para sistemas aeroespaciais complexos

Fernando Teixeira Mendes Abrahão¹

As aeronaves e demais sistemas aeroespaciais podem ser considerados sistemas complexos e dependem de muitos fatores, condições, ações e recursos para que possam operar de forma segura e econômica. Operar de maneira segura pode ter mais de uma definição, assim como operar de maneira econômica. Para fins deste capítulo, a operação segura implica a aeronave estar conforme sua certificação, condição de aeronavegabilidade, condição de manutenção e de despacho, mas também segura do ponto de vista de consciência situacional para saber se ela vai continuar nessas condições por um tempo útil conhecido. A operação econômica implica que a aeronave ou a frota de aeronaves satisfaçam uma relação custo benefício tal que sua operação se verifique rentável/suportável e por quanto de investimento, tanto no curto, médio como no longo prazo.

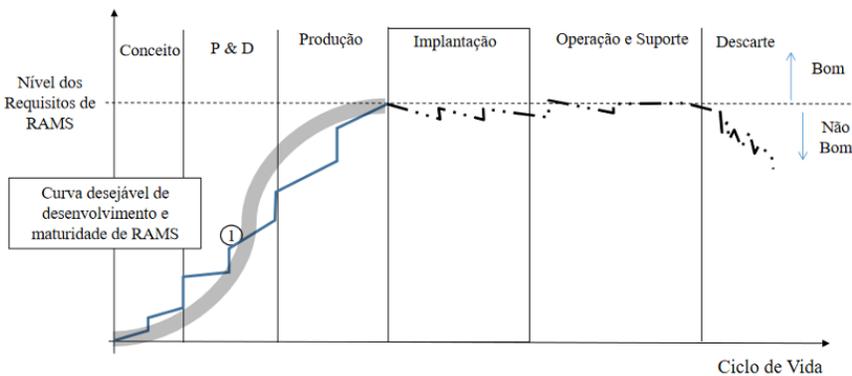
O Problema de Suportabilidade decorre de uma série de circunstâncias que acabam por complicar e/ou deteriorar a relação custo benefício esperada para uma aeronave. Assim como o desempenho geral de uma aeronave depende de sua concepção, desenvolvimento, manufatura e operação, suas condições de suportabilidade também dependem do desenvolvimento de tais características, as quais vão acompanhar o gerenciamento da relação custo benefício da frota por todo o seu ciclo de vida. As complicações ou deteriorações não são exclusivas desta ou daquela fase do ciclo de vida, mas suas consequências são sempre mais

¹ AeroLogLab-ITA (www.aerologlab.ita.br). E-mail: abrahao@ita.br.

graves quando causam problemas de suporte para a fase de Operação e Suporte.

A Figura 1 apresenta graficamente o desenrolar do tempo de um ciclo de vida de uma aeronave, ou de uma frota de aeronaves, quando comparado ao seu desempenho de suportabilidade. O modelo é genérico e pode apresentar algumas variações, dependendo do que possa acontecer durante o ciclo de vida (cancelamento do projeto, modernizações, melhorias, etc.) para cada tipo de aeronave. A figura servirá de base para o entendimento do problema.

Figura 1: Ciclo de vida de um sistema e o desenvolvimento da sua maturidade de suporte onde os requisitos de RAMS combinados, representam a relação custo benefício de suporte esperada para a frota



Fonte: Abrahão (2024).

O eixo das abscissas representa o tempo, desde o início da fase de Concepção, passando pela fase de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D), seguindo com a fase de Produção. A fase seguinte é a razão de ser da maioria das aeronaves produzidas em série, ou seja, a fase de Operação e Suporte (os aviões laboratório, podem fugir desta definição por serem utilizados para desenvolvimento de conceitos e outras peculiaridades bem específicas).

A fase de Operação e Suporte também costuma ser a mais longa, podendo exceder 50 anos de duração. Outra particularidade da fase de Operação e Suporte é que costuma ser iniciada por uma subfase de implantação do novo produto no mercado. Por fim, a fase de Descarte encerra o ciclo de vida. Maiores detalhes sobre o ciclo de vida e o desenvolvimento da suportabilidade de sistemas aeroespaciais complexos pode ser encontrado em AAIA/ASD SX000i *International guide for the use of the S-Series Integrated Product Support (IPS) specifications 3.0* (2021) (<http://www.sx000i.org/>).

O eixo das ordenadas representa o resultado sistêmico dos fatores de Confiabilidade, Disponibilidade, Manutenibilidade e Segurança (do inglês *RAMS: Reliability, Availability, maintainability and Safety*), combinados para propiciar a melhor relação custo benefício possível. A reta tracejada horizontal pode ser entendida com o nível esperado de desempenho dos requisitos de RAMS para um dado sistema e que, em última análise, representa o conjunto equilibrado das principais métricas atribuídas e definidas em seu Conceito de Operações CONOPS (do inglês *CONOPS: Concept of Operations*).

O desempenho representado por essa linha vai depender de um conjunto sistêmico de desempenhos do ponto de vista de Confiabilidade, tanto dos itens componentes, como dos subsistemas e sistema completo, que vai determinar quais e como serão as ações de manutenibilidade de forma que o sistema apresente um índice de disponibilidade suficiente para que a utilização da aeronave possa atender aos critérios da relação custo benefício esperada.

A linha tracejada horizontal representa o desempenho esperado de suportabilidade a ser atingido pelo novo produto. Na realidade, ela pode considerar variações pequenas em função de avanços tecnológicos que porventura aconteçam durante o desenvolvimento e operação do produto. Esse parâmetro é determinado pelo que o Conceito de Operações captura de todas as partes comprometidas e

interessadas para o suporte e operação do novo produto. Nem sempre a indústria usa exatamente o mesmo processo (CONOPS) para delinear tal parâmetro, mas, invariavelmente, utiliza considerações do mercado de operadores e mantenedores para sua definição.

A Linha ① representa o desenvolvimento e o crescimento da maturidade esperado para os requisitos de RAMS na medida que o tempo do desenvolvimento vai correndo. Os esforços começam (ou devem começar) concomitantes com o início da fase de Concepção, em que ocorre o desenvolvimento do Conceito de Suporte - CONSUP e a definição dos requisitos de suportabilidade (normalmente de mais alto nível).

O CONSUP define as estratégias e requisitos básicos (ou de alto nível) de suporte para todas as considerações futuras do ciclo de vida do produto e é fortemente baseado no atendimento aos requisitos operacionais e possíveis cenários de utilização da nova aeronave. O CONSUP inclui parâmetros para Confiabilidade, Disponibilidade, Manutenibilidade, Custos e Testabilidade dos requisitos de suporte.

Ainda, pode incluir diferentes alternativas de suporte ao sistema e que precisam ser investigados quanto a níveis de manutenção (2 ou 3 níveis), contratos baseados em desempenho, recursos necessários, implicações de custo e com todos os riscos associados (AAIA/ASD, 2021).

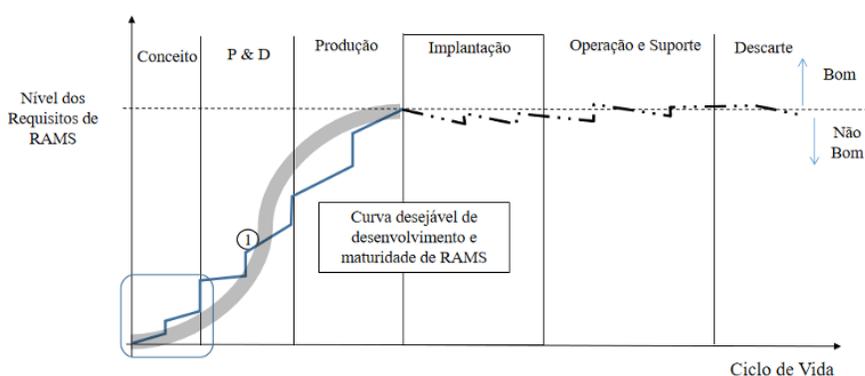
Os requisitos de alto nível geralmente relacionados ao desenvolvimento do suporte de um sistema aeroespacial complexo estão ligados às demandas por:

- **Precisão e exatidão do sistema de manutenção** para garantir que as informações fornecidas permitam o diagnóstico correto dos problemas que assegurem a melhor relação custo-benefício;

- **Consciência Situacional** para que o sistema como um todo (aeronave e sistema que vai suportá-la) avise de forma consistente e atualizada qualquer degradação na relação custo-benefício envolvendo o processo de manutenção e que necessite de atenção e/ou intervenção; e
- **Capacidade de Diagnosticar e Atuar** para que a aeronave permaneça saudável do ponto de vista de sua relação custo-benefício esperada.

Ainda, é nessa fase que são identificadas possíveis alternativas materiais e de engenharia, são desenvolvidos estudos, experimentos e testes de engenharia para a redução dos riscos tecnológicos e deve ser estabelecido um estudo de caso de mercado incluindo análises (modelagem) de alternativas e estimativas de custos do ciclo de vida.

Figura 2: Fase de concepção e o desenvolvimento da sua maturidade de suporte



Fonte: Abrahão (2024).

Percebe-se pela Figura 2, em seu canto inferior esquerdo, que todos esses entregáveis devem estar prontos para dar continuidade ao processo de desenvolvimento da suportabilidade antes do início

da fase de pesquisa e desenvolvimento, pois serão a matéria prima para o desenvolvimento dos estudos e projetos de engenharia de suporte da fase seguinte.

Na sequência do desenvolvimento das competências de suportabilidade, vem a fase de Pesquisa e Desenvolvimento propriamente dita. É de se esperar que o mesmo time que desenvolveu o CONSUP, continue à frente dos trabalhos de desenvolvimento para que não haja falta de continuidade no processo nem perdas na curva de aprendizado, mesmo porque do CONSUP deriva o Conceito de Manutenção - CONMNT, fundamental para o desdobramento dos requisitos de desenvolvimento da suportabilidade.

Nesta fase o produto é desenvolvido e espera-se que o mesmo atenda aos requisitos estabelecidos e desdobrados do CONOPS/CONSUP/CONMNT e ainda possa ser de produção viável, possa ser testado e avaliado, ser operado e suportado e, finalmente, ser descartado ao final de seu ciclo de vida.

Todo o planejamento da fase seguinte (Produção) e seu processos precisam ser desenvolvidos no sentido da sua exequibilidade e custos, além de garantir a suportabilidade operacional da aeronave com foco em otimizar suas características de suporte enquanto minimiza sua pegada logística (do inglês Logistics Footprint). Os entregáveis da fase incluem ainda, uma série de esforços de engenharia no sentido de (US DoD PSM *Guidebook*, 2022; AAIA/ASD, 2021):

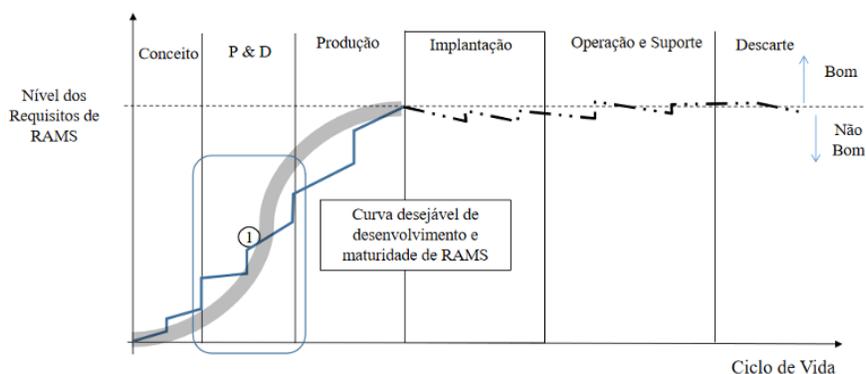
- Desenvolvimento do CONMNT e modelagem do Plano de Manutenção;
- Desenvolvimento de análises de compensação para RAMS;
- Participação na seleção e avaliação de equipamentos e fornecedores;

- Desenvolvimento de alocações e previsões de RAMS e de testabilidade;
- Participação no desenvolvimento formal e informal das revisões de desenho;
- Teste /avaliação dos modelos de engenharia e protótipos;
- Desenvolvimento da 1ª versão do Plano de Suporte Integrado do Produto.

A fase também requer o desenvolvimento e planejamento de todo o sistema de suporte, compreendendo todos os elementos do Suporte Integrado ao Produto (do inglês *IPS Integrated Product Support*).

A Figura 3 apresenta o desempenho esperado das ações de suportabilidade para a fase de Pesquisa e Desenvolvimento, no sentido de fazer tudo o que precisa ser feito e aprimorar tudo para a busca da maturidade de suporte esperada para a aeronave antes da entrega do produto para o 1º operador.

Figura 3: Fase de Pesquisa e Desenvolvimento e o desenvolvimento da maturidade de suporte



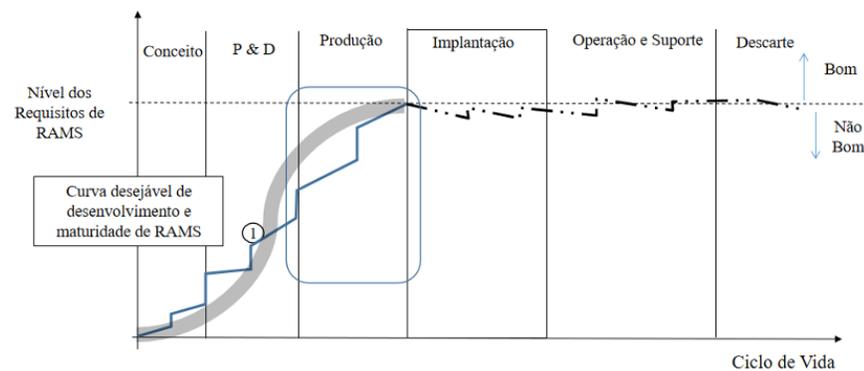
Fonte: Abrahão (2024).

A fase de Produção representa a última chance de desenvolvimento do suporte da aeronave antes de ser entregue para o 1º usuário. Portanto, é de fundamental importância para que já o 1º produto seja entregue para o 1º operador, maduro do ponto de suportabilidade. Na fase, está prevista a produção em série das aeronaves bem como a execução de todos os testes para a certificação tanto da aeronave em si (aeronegabilidade), quanto da sua suportabilidade. Também ocorre o processo de aceitação do produto para confirmar que ele atende aos requisitos, inclusive os de suportabilidade. As atividades previstas para a fase incluem:

- Treinamento inicial para operação e suporte ao novo produto;
- Desenvolvimento e entrega de todo o pacote de dados técnicos e publicações necessárias à operação e ao suporte da frota;
- Pacote inicial de suprimentos e equipamentos de suporte meticulosamente calculados baseados no real desempenho de suporte da aeronave;
- Plano e planejamento dos Serviços de manutenção;
- Plano e planejamento de toda a infraestrutura e instalações necessárias à operação e ao suporte do produto.

A Figura 4 apresenta o desempenho esperado das ações de suportabilidade para a fase de Produção, no sentido de fazer tudo o que precisa ser feito e aprimorar tudo para a que a entrega do produto para o 1º operador possa acontecer com um produto realmente maduro do ponto de vista de suporte.

Figura 4: Fase de Produção e o desenvolvimento da maturidade de suporte



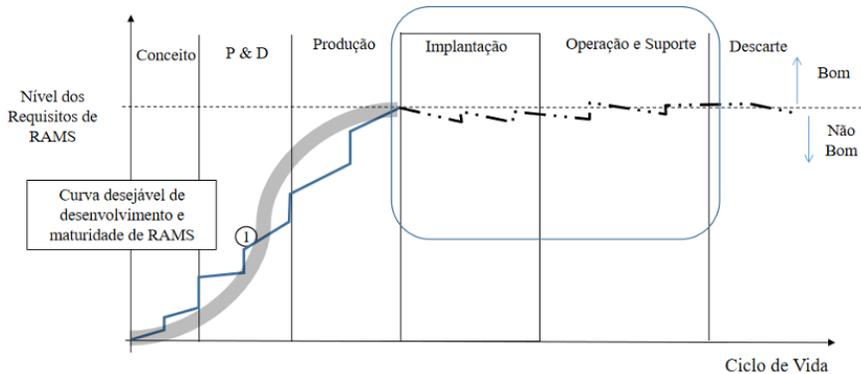
Fonte: Abrahão (2024).

A fase de Operação e Suporte é a razão de ser do produto aeronáutico. Aqui, é de se esperar que o produto funcione de acordo com os requisitos que o originaram, inclusive os de RAMS. A razão custo benefício da aeronave (ou da frota) deve ser a melhor possível, ou pelo menos atingir esse máximo o mais rápido possível e pelo maior tempo possível dentro da fase. A operação do produto em si requer uma série de entregáveis em termos de serviços que precisam ser eficazes tanto do ponto de vista operacional quanto de custos.

Mesmo que o produto seja entregue maduro em relação aos fatores de RAMS, ao longo da fase são esperadas degradações na relação custo-benefício do suporte ao produto que precisam de controle. Um exemplo de degradação que está presente em praticamente todos os casos é o da obsolescência, seja ela a logística ou a operacional - uma quando os itens necessários não estão mais disponíveis e a outra é quando um componente, mesmo disponível no mercado, já não atende a uma função.

Daí a necessidade de se acompanhar o desempenho de RAMS durante toda a fase de Operação e Suporte para poder, em tempo o mais oportuno possível, decidir sobre modificações e eventuais melhorias que a aeronave ou a frota de aeronaves, necessitem. A Figura 5 apresenta a fase de Operação e Suporte em destaque.

Figura 5: Fase de Operação e Suporte e o desenvolvimento da maturidade de suporte

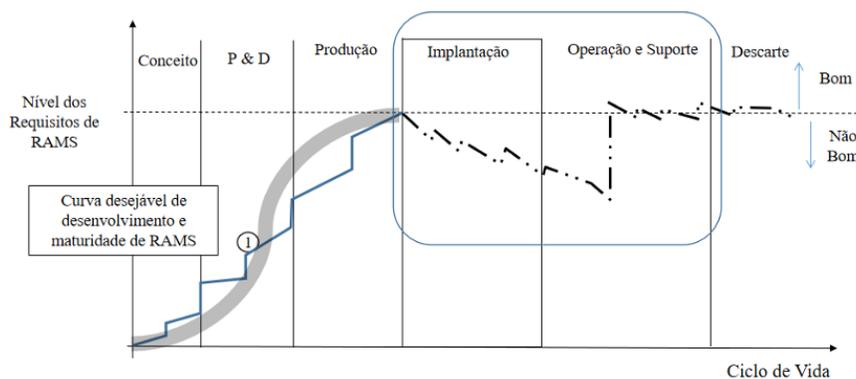


Fonte: Abrahão (2024).

A linha pontilhada em forma de dentes de serra desiguais representa a realidade esperada para o desempenho de suportabilidade da aeronave na medida em que sua idade e utilização, avançam. A todo instante o sistema de suporte está buscando analisar e identificar deteriorações no desempenho de suportabilidade e corrigi-los. Eventualmente, com o envelhecimento da frota, é possível que a aeronave ou a frota precisem de algum tipo de melhoria de meia vida (do inglês *Mid Life Upgrade*). Um exemplo poderia ser o caso da frota de KC-135 da USAF, que passou por um processo de troca dos motores originais, por motores mais modernos e com melhor desempenho de RAMS.

A Figura 6 apresenta a fase de Operação e Suporte com um processo de melhoria de meia vida exemplificado do ponto de vista da sua relação custo-benefício de RAMS. A fase precisa continuamente diagnosticar e analisar a eficácia e eficiência do suporte da aeronave (ou da frota) ao mesmo tempo em que provê todo o suporte que permita a operação continuada e econômica (de acordo com o custo-benefício de RAMS) da frota. Ou seja, se os serviços necessários à suportabilidade não forem entregues de forma controlada e em tempo, as degradações da relação custo-benefício vão ocorrer conforme o gráfico da mesma forma ou de forma acumulativa.

Figura 6: Fase de Operação e Suporte com um programa de melhoria de meia-vida



Fonte: Abrahão (2024).

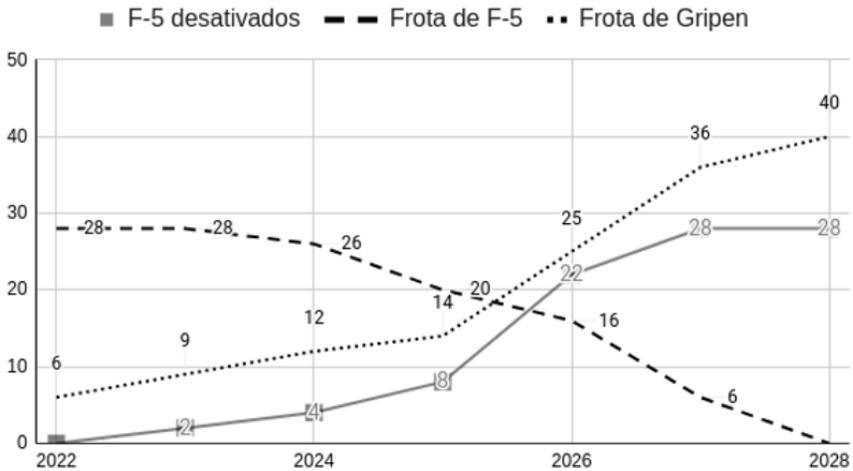
A fase de Descarte encerra o ciclo de vida do produto aeronáutico e contempla uma série de ações necessárias. No caso de aeronaves de defesa, em muitos casos é preciso desmilitarizá-las. Em muitos casos, os produtos de defesa seguem processos de certificação diferentes e as peças podem não ser certificadas para reuso na aviação comercial.

O descarte precisa ser feito de acordo com a regulamentação prevista no que diz respeito a todo o aparato relacionado às aeronaves assim como todo o pacote de sistemas de suporte relacionados. A título de exemplo, ao aposentar uma aeronave, é bem possível que várias de suas oficinas e ferramental também tenham que ser desativadas e descartadas (caso não haja comunalidade com outros sistemas).

Todos os ativos de todos os elementos do Suporte Integrado do Produto - IPS precisam ser descartados com a frota e no caso de um sistema entrar em serviço para substituir um outro sendo descartado, todas as decisões implicam preocupações com a capacidade a ser mantida durante o processo. O trabalho de Renato (2022) e Munhoz (2023) tratam do caso da fase de descarte da frota dos F-5EM da Força Aérea Brasileira ao mesmo tempo em que trata da implementação da frota dos F-39 Gripen.

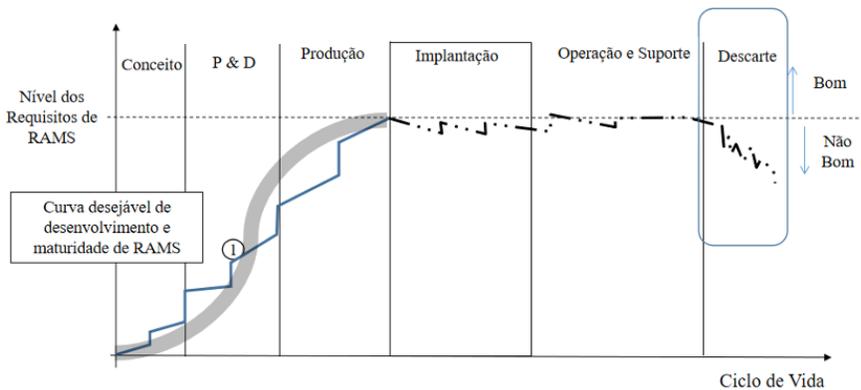
A Figura 7 apresenta uma das possíveis alternativas de descarte x implantação discutidas no trabalho, visto que as medidas de desempenho utilizadas na modelagem para a tomada de decisão foram todas tomadas envolvendo a relação custo-benefício do ponto de vista de RAMS. A Figura 8, por sua vez, apresenta, em destaque, a fase de descarte.

Figura 7: Exemplo de uma instância do faseamento da Fase de Descarte (F-5EM) x faseamento da Fase de Implantação (F-39) para a FAB



Fonte: Adaptado de Renato (2022).

Figura 8: Fase de descarte

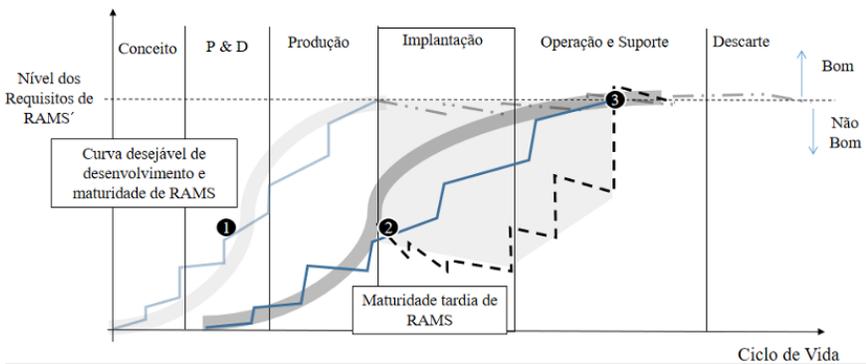


Fonte: Abrahão (2024).

Toda descrição apresentada até agora indica como as coisas deveriam acontecer. No entanto, um fenômeno pode acontecer caso certas medidas não sejam tomadas para que o correto

desenvolvimento da característica e competências de suporte ocorram. A Figura 9 apresenta graficamente tal fenômeno onde a linha de desenvolvimento desejada acaba por escorregar para a direita (atraso no desenvolvimento). Os próximos parágrafos explicam o que acontece com algumas razões e, principalmente as consequências ligadas ao fato.

Figura 9: Desenvolvimento atrasado da suportabilidade, com entrega da 1ª aeronave imatura do ponto de vista de sua maturidade de suporte e de custo-benefício



Fonte: Abrahão (2024).

A Figura 9 mostra um caso onde o desenvolvimento só está atrasado e a maturidade da suportabilidade só vai acontecer um bom tempo depois do lançamento do produto. Este período só é considerado relevante dependendo de cada caso. Uma aeronave de defesa pode contemplar desenvolvimentos operacionais esperados para os primeiros anos de operação, mesmo assim estamos falando de coisas diferentes. Um dos casos que contextualiza o problema é o do MacDoneel Douglas F-4 Phantom 2, aeronave de caça Norte Americana que representou a espinha dorsal da USAF, NAVY e MARINES durante três décadas.

A aeronave entrou em serviço no início dos sessentas e só foi declarada madura pelo General Accountability Office - GAO, uma auditoria de desempenho de custos para sistemas de defesa do governo americano, em 1974. A aeronave mais importante do sistema de defesa aéreo operou cerca de 20 anos de forma imatura do ponto de vista de suportabilidade, sendo declarada madura a apenas 5 anos do início de sua aposentadoria (1981) com a chegada dos GD F-16s. O texto abaixo exemplifica alguns dos problemas, onde alguns sistemas com baixa Confiabilidade e baixa Manutenibilidade (caso do sistema de rádio instalado em baixo do assento ejetável) implicando baixa disponibilidade e que deterioravam a relação custo benefício da aeronave.

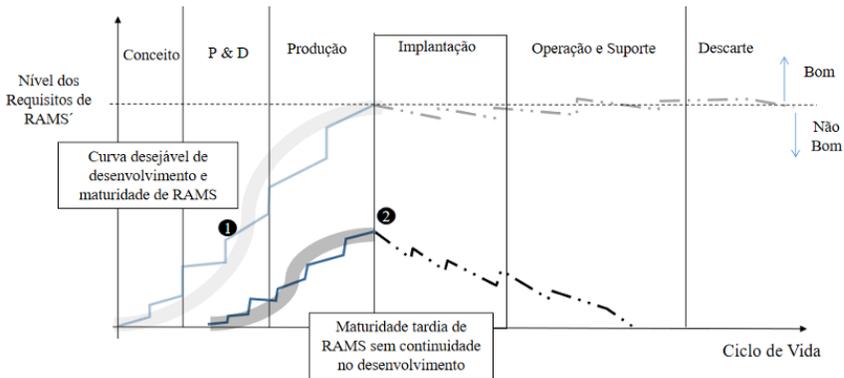
A curva (ou linha) ② apresenta um início de desenvolvimento atrasado em relação à fase de Concepção (linha ① seria o desejável), fazendo com que todo o desenvolvimento da suportabilidade aconteça de forma atrasada em relação ao desenvolvimento da aeronave. Todas aquelas etapas e tarefas descritas para as fases de Concepção, Pesquisa e Desenvolvimento e Produção estarão comprometidas e comprometerão as seguintes, levando a uma condição de aeronave pronta para ser vendida (do ponto de vista de sua certificação), mas que não passou por todas as fases do desenvolvimento de sua suportabilidade. Alguém pode se perguntar se o processo de certificação não seria suficiente para assegurar tal maturidade em termos de suporte, mas os processos de certificação estão focados em aeronavegabilidade e aeronavegabilidade continuada. Os F-4 estavam todos certificados e, mesmo assim, permaneceram mais da metade de sua vida em operação imaturos do ponto de vista de suportabilidade.

No caso da Figura 9, a primeira aeronave é entregue no início da fase de implantação e tem seu desempenho de RAMS rapidamente deteriorado, com uma inclinação muito maior que no caso da curva ①. Mas repare que o desenvolvimento da suportabilidade continua

até que atinge o seu estado esperado no ponto ③. Até lá, a frota vai operar com sua relação custo-benefício extremamente deteriorada, o que, dependendo do caso, pode até ser insustentável para o mercado, comprometendo completamente o sucesso comercial e operacional daquela aeronave. Caso o fenômeno ocorra em, digamos, um ano, e os problemas de maturidade de RAMS estejam resolvidos já a partir da 3ª aeronave entregue, pode se chamar o fato de um caso simpático de melhoria de Confiabilidade. Na realidade, esse período pode levar dez anos (ou mais, como no caso do F-4) e toda a frota ser entregue comprometida. A sombra poligonal formada pelo início da fase de implantação, pela linha horizontal do desempenho esperado de RAMS e pela nova linha dente de serra que começa no ponto ② e vai até o ponto ③, representa os impactos do Problema de Suportabilidade para esse caso.

Outro caso seria quando a indústria considera que o desenvolvimento da suportabilidade do produto está encerrado no ponto ②. A Figura 10 apresenta o caso onde a frota inteira é comprometida pela falta de maturidade dos fatores de RAMS e não acontece a continuidade de seu desenvolvimento. Nesse caso, o produto não atinge a maturidade esperada nunca.

Figura 10: Desenvolvimento atrasado e interrompido da suportabilidade, com entrega da 1ª aeronave imatura e consequente declínio da maturidade de suporte e da relação custo-benefício



Fonte: Abrahão (2024).

Um caso onde problemas de Confiabilidade e Manutenibilidade resultaram em baixa Disponibilidade e grande quantidade de homem-hora manutenção por hora de voo, além de complexidades de suporte desproporcionais para sua operação, é o do Bombardeiro Supersônico Corvaair B-58 Hustler, que nunca chegou a voar maduro e teve o projeto cancelado e a frota retirada de serviço por conta das dificuldades (Abrahão *et al.*, 2019 *apud* Russel, 2007).

A descrição do problema de suportabilidade, de forma ampla e sistêmica conforme apresentado neste capítulo, objetiva contextualizar boa parte da inspiração para o desenvolvimento dos trabalhos apresentados neste livro. O capítulo seguinte apresenta os conceitos de Confiabilidade, Disponibilidade, Manutenibilidade e de Segurança, uma vez que deles derivam praticamente todas as medidas de desempenho de suporte.

Referências Bibliográficas

ABRAHÃO, F.T.M. *et al.* Development of the aerologlabtool. In: Simpósio de Pesquisa Operacional e Logística da Marinha, *Anais do Congresso*, Centro de Análises de Sistemas Navais, Rio de Janeiro, 2019.

ASD/AIA SX000i. *International guide for the use of the S-Series Integrated Logistics Support (ILS) specifications*. 3rd. ed. 2021.

LEONE, Daniel. Former F-4 Crew Members Point Out Phantom's Issues. And they Explain why they Loved Flying it despite its Flaws, *The Aviation Geek Club*, 2020. Disponível em: <https://theaviationgeekclub.com/former-f-4-crew-members-point-out-phantoms-issues-and-they-explain-why-they-loved-flying-it-despite-its-flaws/>. Acesso em: 12 set. 2024.

RUSSEL, S. H. In: Supply chain management: more than integrated logistics, *Air Force Journal of Logistics*, v. 31, n. 2, p. 56-63, 2007.

US DOD PRODUCT SUPPORT MANAGER GUIDEBOOK. *Deputy Assistant Secretary of Defense for Product Support. Office of the Under Secretary of Defense for Acquisition and Sustainment*. 2022.

Conceitos de confiabilidade, disponibilidade, manutenibilidade e segurança (do inglês *Reliability, Availability, Maintainability and Safety - RAMS*)

Guilherme Conceição Rocha¹

A constante introdução de novas tecnologias promove o aumento na complexidade dos sistemas, bem como, potencializa a diminuição do ciclo de vida de um produto, uma vez que, os requisitos de produto estão constantemente sofrendo alterações e atualizações (Blanchar; Blyler, 2016). Contudo, em muitos casos, tais produtos desenvolvidos e colocados em utilização no mercado não satisfazem por completo as necessidades do cliente, em termos de: desempenho, capacidade de suporte, custos operacionais, qualidade, dentre outros fatores.

Tendo isso em vista, surge uma crescente necessidade de se desenvolver e produzir sistemas que enderecem as necessidades do cliente sob a perspectiva total do sistema, a qual pode ser norteadada através de conceitos e métricas da engenharia de sistemas. Um sistema só será capaz de satisfazer completamente às necessidades do cliente se, além de atender a um determinado desempenho requerido, for também capaz de cumprir requisitos de confiabilidade, disponibilidade, manutenibilidade e de segurança.

Tais critérios adicionais, denominam-se requisitos de RAMS, acrônimo para designar *Reliability* (confiabilidade), *Availability* (disponibilidade), *Maintainability* (manutenibilidade) e *Safety* (segurança).

¹ AeroLogLab-ITA (www.aerologlab.ita.br). E-mail: grocha@ita.br.

Os indicadores de RAMS ganharam relevância e usabilidade na indústria manufatureira a partir dos anos 1980, uma vez que observou-se que, por meio da análise e cumprimento dos requisitos definidos para tais indicadores ao longo do projeto do produto, diminui-se o risco de falha e o custo com retrabalho e aumenta-se a capacidade de identificar pontos de melhoria nas características do produto e no seu processo produtivo (Park, 2013).

Confiabilidade

A confiabilidade (ou *reliability*) é definida como a probabilidade de um sistema desempenhar determinada função requerida sob condições estabelecidas durante um período específico (ABNT, 1994).

O contexto em que se insere o estudo da confiabilidade envolve a consideração de componentes ou sistemas submetidos a algum tipo de estresse (tais como vibração mecânica, calor, humidade, corrente elétrica, dentre outros) e sujeitos à ocorrência de falhas ao longo do tempo.

A definição de confiabilidade envolve quatro elementos fundamentais (Halpern, 1978), aqui descritos em detalhe:

- 1. Probabilidade:** A confiabilidade é mensurável (computável, testável e verificável). Devido a esta natureza quantitativa de descrição do desempenho de um sistema ou componente em termos de uma probabilidade, tem-se disponível um conjunto de ferramentas estatísticas e matemáticas classicamente conhecidas.
- 2. Tempo de operação:** A confiabilidade depende do tempo de operação. O tempo de vida útil de um equipamento pode ser definido a partir de sua confiabilidade e vice-versa.

Esta característica é particularmente importante, por exemplo, para o dimensionamento de garantias: sabendo-se que, após um ano de uso, certo produto manterá altos níveis de confiabilidade (ou seja, elevada probabilidade de manter-se operacional e de cumprir suas funções especificadas), uma empresa pode atribuir-lhe tal prazo a título de garantia.

3. **Desempenho:** Um produto pode estar operacional, mas, ao longo do tempo, deixar de cumprir as funções para o qual foi designado. Caso isso ocorra, caracteriza-se uma falha, afetando negativamente a confiabilidade.
4. **Condições operacionais:** Somente é possível avaliar a confiabilidade de um produto se forem determinadas as condições em que este deve operar.

Para maior efetividade na análise e descrição do comportamento da confiabilidade de um produto são utilizadas quatro funções: a função confiabilidade, a Distribuição Acumulada de Falhas, a Densidade de Probabilidades de Falha e a função Taxa de Falhas (*Hazard Rate*).

Manutenibilidade

A manutenibilidade (ou *maintainability*) é a habilidade de um componente de um sistema ser mantido, ou restaurado, para uma condição específica, quando esse componente passa por um processo de manutenção, a qual utiliza procedimentos e recursos pré-determinados (US DOD, 1981).

A manutenibilidade é uma característica do projeto, enquanto a manutenção é uma consequência do projeto que se traduz em uma série de ações que precisam ser tomadas para restaurar ou manter um item em um estado operacional efetivo. Trata-se do aspecto do

projeto que tenta minimizar os requisitos de manutenção corretiva e preventiva, reduzindo os custos de manutenção.

A manutenção desempenha papel central na otimização da produtividade e lucratividade operacional. Ela afeta também o preço de aquisição, o que é compensado por uma operação mais eficiente. O projeto de um sistema complexo exige a inclusão das características de manutenibilidade para facilitar as atividades de manutenção, reduzindo assim os tempos das paradas técnicas e os custos associados, tornando o sistema economicamente mais competitivo e atraente no mercado.

O ciclo do projeto é uma das fases importantes do processo de desenvolvimento de um sistema complexo ou de sua modificação. O conceito de manutenibilidade é um fator chave que deve ser considerado nesse ciclo. Como consequência da incorporação das características de manutenibilidade no projeto, consegue-se diminuir os custos operacionais do sistema e os custos de seu ciclo de vida. Haverá aumento da produtividade em manutenção quando a complexidade das atividades da prevenção e da correção de falhas é diminuída e o tempo improdutivo é reduzido.

Em um mundo de recursos limitados e competição acirrada, a necessidade para controlar os custos operacionais e de suporte tem se tornado um fator decisivo para os operadores de sistemas complexos. Uma das maneiras efetivas de reduzir esses custos concentra-se na adoção sistemática dos conceitos de manutenibilidade ao longo do projeto. Desta forma, a manutenibilidade caracteriza-se como um diferencial competitivo para a nova geração de sistemas complexos.

O desenvolvimento do projeto em que são levados em consideração os requisitos de manutenibilidade, possibilita uma estimativa melhor do cálculo dos tempos necessários para manutenção, devido a(à/ao):

- Avaliações antecipadas quanto aos tempos de parada do equipamento, a habilitação e quantidade de mão de obra, ferramentas, equipamentos de testes e sua adequação às necessidades da manutenção;
- Verificação da conformidade do projeto com os requisitos de manutenibilidade;
- Indicação para o projetista sobre as áreas problemáticas quanto à manutenção, conduzindo a melhoria do produto, modificação ou alteração do projeto;
- Desenvolvimento de alternativas de projeto e estudos de *trade-off* facilitando as decisões sobre a configuração do equipamento; e
- Determinação do sistema de manutenção mais adequado, e as necessidades logísticas.

As atividades de manutenção são simplificadas para diminuir a exigência cognitiva dos mecânicos, melhorando a qualidade e a produtividade, e reduzindo os riscos à segurança pessoal e ambiental.

Antigamente, a manutenibilidade era vista como um ingrediente de 'bom senso' a ser incorporado no projeto do avião. Hoje ela é considerada uma parte integral do processo de desenvolvimento e uma característica inerente de projeto que pode ser avaliada quantitativamente e, portanto, pode ser especificada, demonstrada e sujeita a análises de *trade-off*.

Disponibilidade

A disponibilidade (ou *availability*) é a habilidade de um sistema desempenhar requerida função ao longo de toda vida desse sistema. Em outras palavras, a disponibilidade mensura qual a relação percentual entre o tempo que determinado sistema esteve em operação (tempo *uptime*) pela duração total do ciclo operacional (tempo *uptime* somado ao *downtime*) (Trujillo; Schamer, 2012).

Tanto manutenibilidade como confiabilidade influenciam diretamente a disponibilidade dos equipamentos e sistemas. A interação entre confiabilidade e manutenibilidade deverá ser compreendida quando os objetivos do projeto são estabelecidos, a saber:

- Melhorando a confiabilidade reduz-se as taxas de falha e a necessidade de manutenção corretiva. O equipamento deverá ser projetado com certo nível de confiabilidade para assegurar 'desempenho' adequado durante todo ciclo de vida;
- Desenvolvendo componentes que necessitam baixa frequência de manutenção preventiva. Melhoria na confiabilidade resulta em economia de tempo e mão de obra para realizar a manutenção, e aumenta o tempo disponível para a operação do equipamento; e
- Melhorando a manutenibilidade reduz-se o tempo de parada do equipamento e os custos de tais paradas. Os procedimentos de teste e reparo devem ser simplificados para reduzirem o tempo de diagnóstico e correção de falhas, bem como deve-se reduzir a necessidade de mão de obra especializada. Acesso deverá ser facilitado para substituição e regulagem dos componentes. Deve-se buscar também padronização e intercambiabilidade de peças, ferramentas e equipamentos de teste.

Segurança

A segurança (ou *safety*) é uma característica de desempenho de um sistema que visa limitar a ocorrência de riscos inaceitáveis em relação à operação, manutenção, vida humana, ambiente e equipamento (Park, 2013). Nenhum sistema, feito ou operado pelo homem, pode ser considerado totalmente seguro. Deste modo, a segurança é um estado em que a possibilidade de danos a pessoas e equipamentos é reduzido a um nível mínimo aceitável.

Segurança pode ser interpretada como a ausência de riscos não controlados, ou seja, um estado onde os riscos estão identificados e ou são eliminados, ou são permanentemente mantidos sob controle. As falhas humanas contribuem fundamentalmente para a segurança operacional. As falhas humanas se classificam em (Icao, 2013):

- **Erros:** Atos incorretos involuntários;
- **Violações:** Atos incorretos voluntários, realizados por motivo fútil ou não justificável.

Alguns atos incorretos poderão ser classificados como erros ou violações a depender do contexto, caso tais atos tenham sido voluntários, mas motivados por circunstâncias operacionais.

O erro humano é considerado um fator que contribui para a maioria dos eventos na aviação. Mesmo pessoas competentes cometem erros, e tais atos devem ser aceitos como um componente normal em qualquer sistema onde os seres humanos interagem com a tecnologia. Entretanto, deve-se buscar a minimização da quantidade de erros por meio de estratégias para controle do erro, a saber:

- Redução
- Captura
- Tolerância

As estratégias de redução do erro intervêm nas fontes, reduzindo ou eliminando os fatores contribuintes para a ocorrência dele, tais como:

- Projeto centrado no homem
- Melhoria dos fatores ergonômicos
- Treinamento

As estratégias de captura do erro intervêm logo que foi cometido um erro, capturando-o antes que gere consequências adversas, tais como:

- Uso de listas de verificação
- Testes automatizados

As estratégias de tolerância ao erro intervêm de maneira a aumentar a habilidade do sistema para aceitar os erros sem maiores consequências, como:

- Utilização de sistemas redundantes
- Inspeções estruturais

Um meio eficaz de se alcançar requisitos de segurança consiste na implantação de uma cultura de segurança operacional. A cultura reúne as pessoas como membros de um grupo e fornece modelos de comportamento em situações normais e inusitadas, influenciando nos valores, crenças e comportamentos que membros de distintos grupos sociais compartilham entre si.

A cultura organizacional indica as pautas para um comportamento aceitável no local de trabalho, estabelecendo normas, limites e um marco de referência para a tomada de decisão por parte dos gerentes e empregados. Ela estabelece, entre outros temas, os procedimentos e as práticas de reporte por parte do

peçoal operativo. Por meio da cultura, entende-se o modo como as pessoas agem e desempenham suas funções, as decisões são tomadas e as operações são realizadas mesmo que não exista ninguém supervisionando.

Uma cultura de segurança operacional adequada não deve ser punitiva nem tolerante a qualquer falha humana. Faz-se necessário avaliar se a falha humana representa um erro ou uma violação, bem como se houve alguma atitude agravante. Para tanto, deve-se valorizar a informação, compartilhar responsabilidades, treinar mensageiros, analisar falhas, bem como recompensar reportes e boas ideias.

Referências Bibliográficas

ABNT. *Confiabilidade e manutenibilidade: Terminologia*. NBR 5462, 1994.

BLANCHARD, B. S.; BLYLER, J. E. *System Engineering Management*. 5. ed. New Jersey: Wiley, 2016.

HALPERN, S. *The Assurance Sciences: An Introduction to Quality Control and Reliability*. Prentice-Hall, 1978.

ICAO. *Safety Management Manual (SMM)*. 3rd ed. 2013.

PARK, M. G. *RAMS Management of Railway Systems: Integration of RAMS management into railway systems engineering*. 39 p. Thesis (Degree of Doctor of Philosophy) - University of Birmingham, 2013.

TRUJILLO, D. J.; SCHARMER, C. J. *Reliability, Availability, and Maintainability Considerations in the Design and Evaluation of Physical Security Systems*. Albuquerque, 2012.

US DoD, *Definitions of Terms of Reliability and Maintainability*. MIL-STD-721C, 1981.

Pesquisa operacional e problemas de suportabilidade

Antonio Celio Pereira de Mesquita¹

Introdução

As técnicas de análise do estado da arte podem oferecer novas percepções e oportunidades que podem melhorar a tomada de decisão por meio da otimização. Assim, este capítulo aborda os problemas inerentes à suportabilidade de sistemas, os modelos matemáticos e as possibilidades do uso das ferramentas de Pesquisa Operacional na sua solução.

A capacidade de suporte de sistemas complexos refere-se à aptidão de um sistema tecnológico ou uma organização, de ser efetivamente mantido, atualizado, reparado e aprimorado temporalmente. Um sistema complexo é aquele sendo composto por muitas partes interconectadas que interagem de forma não linear, dificultando prever como o sistema se comporta em diferentes condições.

À medida que os problemas de otimização se tornam maiores, eles ficam exponencialmente mais difíceis de resolver. Porém, um sistema complexo pode ser subdividido, para fins de análise, em subsistemas modeláveis e otimizáveis.

A capacidade de suporte envolve:

- Aptidão de diagnosticar problemas,

¹ AeroLogLab-ITA (www.aerologlab.ita.br). E-mail: celio.mesquita@gp.ita.br.

- Disponibilidade dos recursos necessários (como pessoal, ferramentas e peças de reposição),
- Eficiência dos processos de manutenção e reparo,
- A propriedade de fazer alterações no sistema sem causar interrupções e de se adaptar a novos requisitos e ambientes em mudança.

Também é importante destacar que cada subsistema está exposto a riscos que precisam ser quantificados sob os pontos de vista da probabilidade de ocorrência de algum infortúnio, bem como do impacto que isto causaria ao sistema.

Um sistema complexo e seus subsistemas devem ser projetados com a capacidade de suporte em mente desde a concepção. Isso pode envolver o projeto do sistema com as seguintes características:

- Componentes modulares que podem ser facilmente substituídos ou atualizados,
- utilizando-se de ferramentas de diagnóstico eficazes,
- garantindo que os recursos necessários estejam disponíveis e
- projetando processos de manutenção e reparo que sejam eficientes.
- Além disso, o sistema deve ser continuamente monitorado e avaliado para identificar possíveis problemas, riscos e possibilidades de melhoria.

Detalhes poderão ser encontrados em Marques *et al.* (2020).

Aplicações da pesquisa operacional no desenho da suportabilidade

A Pesquisa Operacional (PO) é um campo de estudo que usa modelagem matemática, técnicas de otimização e métodos analíticos para resolver problemas complexos em negócios, engenharia e outros campos. O objetivo da PO é encontrar soluções ótimas ou muito próximas do ótimo em curto tempo para problemas que envolvem múltiplas variáveis, restrições e objetivos.

A PO pode ser usada para mitigar problemas de capacidade de suporte em sistemas complexos, fornecendo uma estrutura para analisar e melhorar ou restabelecer essa capacidade. Especificamente, a PO pode ser usada para:

- Prever a probabilidade e o impacto dos problemas de suporte: ao criar modelos que simulam o comportamento do sistema e identificar possíveis gargalos ou pontos de falha, a PO pode ajudar a prever onde os problemas de suporte são prováveis de ocorrer e qual seria o impacto desses eventos.
- Otimizar a alocação de recursos: a PO pode ajudar a otimizar a alocação de recursos (como pessoal, ferramentas e peças sobressalentes) para garantir que os problemas de capacidade de suporte sejam tratados eficientemente.
- Projetar processos eficazes de manutenção e reparo: a PO pode ser usada para projetar processos de manutenção e reparo que sejam eficientes e minimizem a interrupção do sistema.
- Avaliar o impacto das mudanças: A PO pode ser usada para avaliar o impacto das mudanças propostas no sistema (como atualizações ou modificações) na capacidade de suporte e para identificar possíveis problemas antes que eles ocorram.

No geral, a Pesquisa Operacional fornece um poderoso conjunto de ferramentas e técnicas que, se corretamente configuradas em coerência com o modelo matemático, poderão mitigar problemas de capacidade de suporte em sistemas complexos e garantir que esses sistemas permaneçam confiáveis.

ORGANIZAÇÃO CIENTÍFICA DA MANUTENÇÃO

O problema da programação da manutenção preventiva

O problema de programação da manutenção preventiva (PPMP) pode ser definido como o problema relacionado com a programação da manutenção vivenciado por um sistema que possua uma frota de veículos (aviões, caminhões, máquinas, tratores, trens, etc.) sujeita a múltiplas restrições. O PPMP envolve dois tipos básicos de programação de atividades:

- Programação das tarefas de manutenção nas oficinas, onde os problemas são similares aos problemas de sequenciamento de tarefas (do inglês *scheduling*), que envolvem, tipicamente, a alocação de recursos limitados a tarefas ao longo do tempo. Neste caso, a solução do problema está em encontrar uma sequência para todas as fases necessárias a uma revisão (testes, inspeções, delineamento das atividades, desmontagem, limpeza, reparos, substituições, montagem, pintura, testes, etc.), dadas limitações de recursos das oficinas.
- Programação dos recolhimentos das aeronaves para as atividades de manutenção preventiva necessárias, segundo as restrições verificadas no sistema.

A solução, neste segundo caso, pouco ou nada tem a ver com a programação do que acontece nas oficinas, mas sim, com a ordenação dos recolhimentos para as atividades de manutenção preventiva necessários a uma frota de aeronaves ao longo de um período previsto de seu ciclo de vida. Este foi o foco do trabalho de doutorado de Abrahão (2006).

Decisões sobre internalizar ou não a manutenção de 3.º nível

Manutenção de 3º nível é a manutenção que exige configuração mais complexa, com bancadas, equipamentos e ferramentas especiais, cuja instalação e suporte são caros, forçando a fixação de um local físico, devido o elevado custo para sua movimentação.

Em grandes centros comerciais pode ser vantajosa a contratação de empresas especializadas, porém em locais remotos, pode ser estratégica a internalização desses serviços.

O processo de tomada de decisão sobre internalizar ou não a manutenção de 3º nível normalmente envolve a ponderação dos custos e benefícios associados a ambas as opções. Internalizar a manutenção pode ser uma opção mais econômica, por eliminar a necessidade de contratar e pagar pessoal de manutenção externo. Por outro lado, pode ser um processo mais demorado e complexo, por requerer treinamento e gerenciamento da equipe para garantir a qualidade do trabalho. Além disso, pode ser difícil obter peças e componentes com o mesmo custo de fornecedores de manutenção externos. No final das contas, a decisão deve ser baseada em uma modelagem e otimização dos custos, benefícios e riscos associados.

Normalmente, esta análise é realizada pelo AeroLogLab por meio da plataforma OPUS 10 (www.systecongroup.com).

Análise de dados para diagnóstico ou prognóstico

Os equipamentos modernos produzem dados de elevado número de sensores, sendo que esses dados precisam ser continuamente analisados a fim de detectar possíveis anomalias ou ensejar possibilidades de melhoria na funcionalidade, eficiência e na confiabilidade.

A análise de dados para diagnóstico ou prognóstico para planejamento de manutenção de componentes de aeronaves normalmente envolve a coleta e análise de uma variedade de fontes de dados, como registros de voo e manutenção, previsões meteorológicas, aeronaves, sistemas e outras fontes de informações relacionadas à aeronave. Esses dados são usados para identificar possíveis problemas que podem afetar o desempenho e a segurança da aeronave, bem como para avaliar a condição de componentes e sistemas.

Essa análise é frequentemente usada para prever e planejar futuras tarefas de manutenção, como manutenção preventiva, reparos e substituições. Além disso, a análise de dados pode ser usada para monitorar o desempenho de aeronaves e identificar possíveis tendências ou padrões repetitivos.

Duncan Imbassahy (2022) propôs o método *Generic Anomaly Diagnosis Hybridisation Algorithm* (GADHA), um algoritmo de hibridização para diagnóstico de anomalias visando analisar diferentes algoritmos de aprendizado supervisionado, combinados em dois níveis de decisão para estimar o estado atual do sistema.

Plano de manutenção resiliente com otimização e aprendizado de máquina

A técnica de *Machine Learning* (ML) ou aprendizado da máquina está ligada às máquinas que possuem capacidade de aprendizagem própria para realizar ações ou tomar decisões para atividades por técnicas específicas, Big Data e inteligência artificial (IA).

O aprendizado pode ocorrer pela supervisão de um programador que faz a inserção de parâmetros no sistema, ou interativamente, onde os algoritmos adaptam-se aos dados, permitindo cruzar informações que façam previsões baseadas na análise de dados, sem terem sido programadas especificamente para isso.

Um plano de manutenção resiliente com otimização e aprendizado de máquina é uma abordagem proativa que usa análise preditiva e ciência de dados a fim de identificar possíveis problemas e otimizar os cronogramas de manutenção.

Essa categoria de plano usa algoritmos de aprendizado de máquina para analisar leituras de sensores, dados históricos e outras informações para prever quando o equipamento provavelmente precisará de manutenção e otimizar o tempo das tarefas de manutenção.

Essa abordagem pode melhorar a eficiência e a confiabilidade, além de reduzir o tempo de inatividade e os custos. Além disso, ajuda a identificar possíveis problemas antes que se tornem grandes, evitando assim reparos caros ou paradas não planejadas.

Conhecido como um problema de programação ou *scheduling*, tarefas são agrupadas em pacotes temporais, algumas tarefas dispendiosas eventualmente poderão ser alocadas como *out-of-phase* (fora dos pacotes) e, em cada pacote, as tarefas

são agrupadas por zona, por qualificação do mecânico e por precedência entre tarefas. O objetivo global é a eficiência traduzida como minimização de custos e do tempo de parada, bem como minimização dos custos de oportunidade. Detalhes poderão ser encontrados em Mata Filho *et al.* (2023).

Problema de planejamento de voos e manutenção

Do inglês *flight maintenance planning problem* (FMPP), podem planejados pelas companhias aéreas por meio da divisão em grupos de problemas elementares: desenvolvimento das rotas, desenho do cronograma, designação de frota, rotas de manutenção e pareamento de tripulação.

As abordagens usadas para resolver esses subproblemas podem ser divididas em dois grupos básicos: abordagens usadas apenas para resolver um dos problemas mencionados (abordagens de propósito único) e procedimentos que resolvem mais de um problema básico em simultâneo (abordagens integradas).

O Problema de Planejamento de Voos e Manutenção é uma abordagem integrada de otimização que visa encontrar a melhor rota para o voo de um avião e a manutenção necessária para mantê-lo em condições seguras. Ele envolve determinar a rota ótima para o voo, bem como o calendário de manutenção apropriado para a aeronave antes de cada voo.

Está relacionado ao problema de programação de voos, mas tem um foco maior na manutenção e na segurança operacional. É importante para garantir que os voos sejam executados com segurança e eficiência, além de reduzir custos de manutenção. Este problema envolve as seguintes variáveis:

- Custo e Tempo do voo (combustível)
- Consumo por hora de voo
- Custo e Tempo de manutenção
- Custo de oportunidade (lucro cessante devido ao equipamento parado)
- Restrições de segurança
- Restrições de orçamento
- Restrições de programação de voo
- Restrições de rota

Como a realização de manutenção está diretamente relacionada ao consumo de horas de voo, é necessário balancear as horas a serem voadas por cada aeronave e as atividades de manutenção para garantir a máxima quantidade de aeronaves disponíveis.

O processo de determinar qual aeronave irá operar e qual aeronave será submetida à manutenção é realizado manualmente na Força Aérea Brasileira (FAB), sendo demorado, trabalhoso e não considera a disponibilidade e o esforço aéreo requerido como objetivos de médio ou longo prazo.

Silva (2018) desenvolveu um método de resolução do FMPP via uma combinação do algoritmo genético com um método exato de programação de metas, a fim de gerar uma programação eficiente e rápida, conferindo certeza no planejamento dos voos.

Avaliação do impacto de atrasos e cancelamentos em rotas operacionais para fins de minimização do risco

Os atrasos e cancelamentos em rotas operacionais de aeronaves comerciais envolve a análise de diversos fatores, como o custo direto e indireto, o tempo perdido para os passageiros, a satisfação dos clientes, a segurança e a ciência operacional.

O custo direto inclui prejuízos financeiros como a perda de receita, custos de combustível, compensações aos passageiros, aumento de horas extras para os tripulantes e outras despesas.

O custo indireto inclui os efeitos sobre a imagem da companhia aérea, a fidelidade dos passageiros e a reputação da companhia aérea. Além disso, a análise do impacto também pode incluir fatores como o número de atrasos e cancelamentos, a duração dos atrasos e a categoria de aeronave.

Um modelo matemático e uma ferramenta de PO pertinentes podem auxiliar no planejamento, considerando os riscos de atraso ou cancelamento, visando antever esses riscos e possibilitando um planejamento mais assertivo.

Problema de roteamento e manutenção de aeronaves para frotas compartilhadas, incluindo informações de prognóstico de saúde das aeronaves

Os problemas de roteamento e manutenção de aeronaves são considerações críticas para frotas compartilhadas de aeronaves. Esses problemas afetam a segurança e a confiabilidade da aeronave e podem ter consequências financeiras significativas para a companhia aérea ou empresa que possui e opera a frota.

O roteamento de aeronave refere-se ao processo de determinação da rota ideal para uma aeronave viajar, considerando, fatores como consumo de combustível, condições climáticas e congestionamento do tráfego aéreo. Esse processo envolve a análise de abundantes de dados, incluindo dados históricos de voos, previsões meteorológicas e informações de tráfego aéreo em tempo real. O objetivo do roteamento de aeronaves é minimizar o tempo de voo, o consumo de combustível e os custos operacionais gerais, garantindo segurança e confiabilidade.

Uma maneira de resolver problemas de roteamento e manutenção de aeronaves é por meio do uso de sistemas de prognóstico de integridade de aeronaves. Esses sistemas usam sensores e análise de dados para monitorar a integridade e o desempenho dos componentes da aeronave em tempo real, permitindo que as equipes de manutenção detectem e resolvam possíveis problemas antes que se tornem problemas sérios.

Os sistemas de manutenção preditiva também podem usar algoritmos de aprendizado de máquina para analisar dados históricos e prever quando a manutenção é necessária, ajudando a minimizar o tempo de inatividade e reduzir os custos.

Em resumo, os problemas de roteamento e manutenção de aeronaves são considerações críticas para frotas compartilhadas de aeronaves, e o gerenciamento eficaz dessas questões é essencial para garantir a segurança, confiabilidade e lucratividade da frota. O uso de sistemas de prognóstico de integridade de aeronaves pode ajudar a resolver esses problemas, fornecendo monitoramento em tempo real e recursos de manutenção preditiva.

Para detalhes sobre este assunto consulte Pereira Barreto (2022).

O problema da otimização do leiaute de uma instalação para manutenção de aeronaves

A otimização do leiaute de uma instalação para manutenção de aeronaves é uma parte importante do processo geral de manutenção de aeronaves. Este processo envolve a otimização do espaço na instalação para garantir que todos os equipamentos e pessoal necessários estejam localizados nas posições mais eficientes para maximizar a produtividade e minimizar os custos.

Isso pode envolver reorganizar o leiaute da instalação, como mover estações de trabalho e equipamentos, adicionar ou remover paredes e reconfigurar o fluxo de pessoal e materiais. Além disso, as instalações devem ser projetadas para reduzir riscos, como perigos elétricos e de incêndio, além de permitir acesso fácil a ferramentas e peças.

O leiaute ideal de uma instalação para manutenção de aeronaves também inclui considerar a ergonomia e a segurança do pessoal, fornecendo espaço adequado para movimentação e equipamentos de segurança.

Do ponto de vista da otimização, o objetivo seria minimizar os percursos de movimentação dos técnicos, conferindo agilidade e eficiência. As ferramentas mais utilizadas tenderiam a ficar mais acessíveis e as pouco empregadas em posições mais recuadas.

Otimização da localização de instalações de manutenção da frota

A otimização da localização de instalações de manutenção de aeronaves é a análise de fatores para determinar o melhor local para a instalação de um hangar de manutenção. Estes fatores incluem a proximidade de outras instalações de manutenção, a quantidade de tráfego aéreo, as condições climáticas, a infraestrutura disponível,

as qualificações de mecânicos disponíveis e outros fatores. Além disso, existem outras variáveis que devem ser consideradas, como custos, localização e segurança.

Busca-se, nesses casos, resolver um problema de localização com cobertura completa de uma região visando a determinar o menor número de hangares de manutenção para atender a demanda da frota de aeronaves. Para garantir o atendimento da demanda, pode-se assumir que exista um nível de confiabilidade do serviço e, pode-se considerar ainda, um limite inferior de probabilidade de indisponibilidade e buscar minimizar os custos de instalação.

Eles são classificados em dois modelos: problema de cobertura (*Set Covering Problem*) e problema de localização de máxima cobertura (*Maximal Covering Location Problem*). Simplificando, o objetivo pode ser o de maximizar a eficiência global da companhia aérea, minimizando custos sem perda de eficácia no transporte aéreo. Detalhes sobre este problema poderão ser encontrados em Matos *et al.* (2019).

ORGANIZAÇÃO CIENTÍFICA DA ARMAZENAGEM

Otimização de estoques de peças sobressalentes

A otimização de peças de reposição é um processo utilizado para minimizar a quantidade de peças de reposição que uma empresa precisa ter em seu estoque a fim de atender à demanda dos clientes, especialmente, no nosso caso, as oficinas de manutenção. Envolve analisar os vários tipos de peças estocadas e determinar quais peças são realmente necessárias e quais possuem baixa taxa de consumo. Eventualmente, compensa ser reativo e adquirir somente quando surge a necessidade. A não ser quando é sabido que determinados fornecimentos são demorados

e o componente precisa ser mantido em estoque a fim de evitar interrupção nas operações.

A otimização do estoque de peças sobressalentes pode ajudar uma empresa a economizar dinheiro em custos de armazenamento, reduzir o desperdício e melhorar o atendimento ao cliente, tendo as peças necessárias prontamente disponíveis quando os clientes precisarem delas, seja oriunda do estoque ou de um fornecedor local.

Assumindo que a demanda é conhecida a partir dos dados do ano anterior e que seria constante para uma temporada inteira, mas diferente para diferentes temporadas.

Um modelo simples que representa essa situação é o da quantidade de pedido econômico (*economic order quantity* - EOQ), às vezes também é chamado de modelo econômico de tamanho de lote. O modelo EOQ é a quantidade do pedido que minimiza os custos totais de manutenção e os custos de pedido.

$$EOQ = \sqrt{\frac{2xNxC}{R}} \quad (1)$$

Onde N é a quantidade de componentes a serem adquiridos, C o custo esperado do pedido e R o custo adicional de pedido e estocagem.

O EOQ considera o momento do novo pedido, o custo incorrido para fazer um pedido e os custos para armazenar mercadorias. Se uma empresa está constantemente fazendo pequenos pedidos para manter um nível de estoque específico, os custos de pedidos são maiores, com a necessidade de espaço de armazenamento adicional.

Exemplo de Quantidade de Pedido Econômico: Considere um fornecedor de componentes eletrônicos que oferece uma linha de fones aeronáuticos. Ele vende $N = 1.000$ fones por ano. Custa à empresa $R = \$5$ por ano para manter um único fone em estoque, e o custo para fazer um pedido é de $C = \$2$. Por meio da Equação (1), resulta em 28,3 fones. O tamanho ideal do pedido para minimizar custos e atender a demanda dos clientes é de pouco mais de 28 fones.

Estimativas de abastecimento por meio de aprendizado de máquina

A importância das técnicas de *Machine Learning* (ML) no controle de estoque é projetar a demanda com maior segurança e precisão, prevendo fornecimentos futuros sem grandes riscos e viabilizando pedidos de compras automaticamente. Além disso, o ML pode prever perdas e solucionar problemas que comprometem os resultados, como rupturas, custos elevados com carregamentos e baixo giro dos produtos em suas respectivas curvas.

- **Vantagens:** A aprendizagem de máquina influencia as atividades mais complexas da logística e dos armazéns, proporcionando maior precisão e transparência nos dados.
- **Desempenho da entrega:** A eficiência na gestão de entregas e os custos de frete podem ser aperfeiçoados com a utilização do ML. Com parâmetros e uma extensa base de dados, a escolha dos métodos de transporte é mais precisa, diminuindo os riscos para toda a cadeia de suprimentos.
- **Previsão da demanda:** Com o aprendizado de máquina, a previsão da demanda se torna definida, auxiliando no planejamento estratégico de vendas e logística e permitindo que as operações trabalhem com baixos níveis de estoque.

- **Visibilidade de toda a cadeia de suprimento:** O ML, juntamente à telemática (Internet das Coisas ou IoT internet of things), permite que toda a logística seja monitorada em tempo real, tornando eficientes as entregas e a coordenação entre setores.

Simulação dos processos internos de suprimento e otimização de leiaute

Os processos internos e a otimização de leiaute podem ser simulados e testados para determinar o melhor leiaute possível para um determinado espaço. A simulação de processos internos e otimização de leiaute podem ajudar a reduzir custos, melhorar o atendimento ao cliente do armazém e aumentar a eficiência da cadeia de suprimentos.

Do ponto de vista da otimização, o objetivo seria minimizar os percursos de movimentação dos suprimetistas, conferindo agilidade e eficiência. Os componentes mais fornecidos tenderiam a ficar mais acessíveis e os pouco fornecidos em armários mais recuados e prateleiras mais altas.

Para otimizar o leiaute de um armazém deve-se considerar fatores como o espaço disponível, o número de artigos e sua sazonalidade, as perspectivas futuras ou os equipamentos de movimentação utilizados.

Deve-se, ainda, identificar e analisar os problemas da instalação; analisar o tipo de produto disponível e as necessidades da empresa; aproveitar o espaço do armazém e, simultaneamente, maximizar a produtividade das operações de movimentação; planejar a distribuição do espaço para atividades afins: recebimento, preparação armazenamento, etc., supervisionar e analisar a atividade realizada nas docas de carga; considerar as

perspectivas de futura ampliação; e simular o funcionamento do armazém com um software especializado.

ORGANIZAÇÃO CIENTÍFICA DA DISTRIBUIÇÃO

Otimização da localização de instalações de distribuição

A otimização da localização das instalações de distribuição é um aspecto importante do gerenciamento da cadeia de suprimentos. Ao localizar estrategicamente os centros de distribuição próximos ao ponto de demanda, as empresas podem reduzir os custos de transporte, minimizar os prazos de entrega e melhorar o atendimento ao cliente.

A otimização da localização das instalações de distribuição geralmente é feita usando uma combinação de modelos analíticos, como sistemas de informações geográficas, para identificar os locais mais adequados e, em seguida, usar algoritmos de otimização para escolher a localização ideal. Esse processo pode ajudar a garantir que o centro de distribuição esteja localizado no local mais eficiente e econômico.

Localizações não otimizadas podem acarretar ineficiência na suportabilidade de sistemas complexos. À semelhança dos problemas de localização de instalações de manutenção, eles são classificados como problema de localização de máxima cobertura (*Maximal Covering Location Problem*). Simplificando, o objetivo pode ser o de maximizar a eficiência global do operador logístico, minimizando custos sem perda de eficácia. Detalhes sobre este problema poderão ser encontrados em Matos *et al.* (2019).

Problema de roteirização, carga e descarga como fator impactante da suportabilidade

O fornecimento de peças de reposição muitas vezes dá pouca atenção à otimização das rotas de transporte porque muitas vezes é visto como uma preocupação secundária e não como uma prioridade. Além disso, os métodos existentes de otimização de rotas de transporte nem sempre são considerados do ponto de vista da capacidade de suporte.

Como resultado, muitas organizações simplesmente optam pela rota mais direta, que muitas vezes não considera outros fatores, como recursos disponíveis, custo e tempo. Adicionalmente, a complexidade do processo e a falta de recursos e competência também podem contribuir para a falta de atenção dada à suportabilidade na otimização das rotas de transporte. Parte desse processo de distribuição pode ser terceirizado ou realizado por meio de frota própria, a depender da estratégia da organização.

De qualquer forma, faz-se mister que as demandas de cada cliente sejam atendidas, trecho a trecho, de possíveis rotas de coleta e entrega de componentes e equipamentos.

O problema, então, consiste em realizar rotas de coleta e entrega simultâneas com restrições de capacidade em volume, peso e passeio do centro de gravidade do veículo (aeronave, caminhão ou navio). Além disso, restrições de destino, a fim de que componentes e equipamentos sejam entregues ao cliente correto. Este foi o foco do trabalho de Mesquita & Sanches (2023).

Decisões multicritério na cadeia de suprimento

A tomada de decisão nos níveis estratégico, tático e operacional de uma organização desempenha um papel vital para garantir que sua cadeia de suprimento esteja operando com eficiência, permitindo-lhe atingir os mais altos níveis de satisfação do cliente a um custo próximo do ideal.

Em cada nível, a natureza da tomada de decisão, bem como as atividades relacionadas são diferentes:

- decisões de nível estratégico, com um efeito duradouro, como decisões relacionadas à localização e à capacidade do armazém,
- decisões de nível tático que incluem decisões para o futuro ano, como as relacionadas à produção, nível de estoque, absorção de incertezas no plano de produção, transporte, etc.; e
- decisões de nível operacional, como carga e descarga, plano de produção diário e assim por diante.

Existem vários métodos de apoio à decisão multicritério. A escolha dependerá de uma modelagem detalhada do problema em conjunto com o decisor. O decisor precisa entender tudo o que foi assumido durante a modelagem, bem como as limitações de cada alternativa de ferramenta.

O método AHP (*Analytic Hierarchy Process*) primeiro decompõe o problema de decisão em uma hierarquia de subproblemas. Em seguida, o tomador de decisão avalia a importância relativa de seus vários elementos por meio de comparações pareadas. O AHP converte essas avaliações em valores numéricos (pesos ou prioridades), usados para calcular uma pontuação para cada alternativa (Saaty, 1980). Um índice de consistência mede até que ponto o tomador de decisão foi consistente em suas respostas.

O método PROMETHEE baseia-se em uma matriz de decisão, permitindo a comparação das alternativas em relação a cada critério. Este método é especialmente útil quando há muitos critérios e as alternativas são muito diferentes entre si.

O método ELECTRE utiliza uma abordagem diferente da do PROMETHEE, ao utilizar pesos diferentes para os critérios, permitindo que alguns critérios sejam considerados mais importantes do que outros. Ele também considera a preferência do decisor em relação a cada critério, permitindo que os resultados reflitam a subjetividade do processo de decisão.

O método DEA (Análise Envoltória de Dados) é especialmente útil quando as alternativas são muito diferentes entre si, e quando se deseja identificar as melhores práticas ou os pontos fortes e fracos de cada alternativa.

O método TOPSIS permite que os critérios sejam classificados em ordem de preferência. Ele utiliza uma abordagem de distância relativa para avaliar as alternativas em relação aos critérios, e é especialmente útil quando se deseja identificar a melhor alternativa em um conjunto heterogêneo de opções. Existem muitos outros métodos, sendo estes os mais comuns.

Cada um desses métodos tem suas próprias vantagens e desvantagens, e a escolha da ferramenta mais adequada dependerá das características específicas do problema de decisão em questão. É importante destacar que a escolha da ferramenta não é a única etapa do processo de tomada de decisão. É fundamental também que sejam definidos claramente os objetivos e critérios de avaliação, que sejam coletados dados confiáveis e que sejam considerados os aspectos subjetivos do processo de decisão.

Com relação aos dados coletados, pode haver soluções data-driven. Muitas vezes os dados estão disponíveis, mas também

pode haver profissionais experientes, *preference-driven*. Pode-se contar com as opiniões especializadas ou com a análise de dados na tomada de decisões, a depender da preferência do decisor.

ORGANIZAÇÃO CIENTÍFICA DA OBTENÇÃO

Análise multicritério na seleção de fornecedores

As análises multicritério geralmente utilizam os métodos *analytic network process* (ANP) e *analytic hierarchy process* (AHP). O ANP é uma forma mais geral do AHP usado na análise de decisão multicritério.

O AHP estrutura um problema de decisão em uma hierarquia com um objetivo, critérios de decisão e alternativas, enquanto o ANP o estrutura como uma rede. Ambos então usam um sistema de comparações pareadas para medir os pesos dos componentes da estrutura e, finalmente, classificar as alternativas na decisão.

A título de exemplo, a fim de se contratar um engenheiro, pode-se elencar duas competências: experiência e habilidades em gestão. A experiência pode ser técnica ou de vendas, e as habilidades de gestão podem ser: da produção, de equipes, de finanças e de manutenção.

Supondo-se que haja três candidatos, compara-se pares de competências, pontuando-se de 0 a 9 para um candidato ou para o outro, sendo que, no final, uma operação entre matrizes define graus de acordo com todas as avaliações par a par realizadas por um ou por mais de um avaliador. Um exemplo prático pode ser encontrado em <http://tool.aerologlab.ita.br/mcdm2>

No caso de uma seleção de fornecedores, será preciso definir o objetivo, os critérios e subcritérios de avaliação, bem como os fornecedores candidatos. Detalhes do funcionamento podem ser encontrados em Saaty (1996) e Saaty (2005).

Assumpção (2020) desenvolveu um modelo de referência para avaliação de suportabilidade em aquisições de sistemas de defesa, onde realiza uma aplicação de AHP para decisão sobre seleção de propostas de fornecimento (*request for proposal*) de produtos de defesa.

O problema da gestão de obsolescência

O gerenciamento de obsolescência de componentes envolve identificar e gerenciar os riscos associados a componentes e peças obsoletos ou em vias de faltarem fornecedores. Isso inclui monitorar os níveis de consumo e estoque de componentes e peças, prever a demanda futura, planejar fornecedores alternativos e desenvolver estratégias para substituir componentes obsoletos.

Destaca-se, ainda, que as organizações devem considerar o desenvolvimento de relacionamentos com fornecedores que ajudem a reduzir os riscos de obsolescência, seja por meio de engenharia reversa ou de modelos atualizados que superem as funcionalidades dos antigos.

As variáveis do problema de gerenciamento de obsolescência podem incluir: mudanças tecnológicas, disponibilidade de componentes, ciclo de vida do produto, custo, conformidade regulamentar, complexidade do sistema, interrupções na cadeia de suprimentos, e tolerância ao risco. No geral, as variáveis do problema de gestão da obsolescência podem ser complexas e multifacetadas, exigindo planejamento e gestão cuidadosos para garantir que produtos e sistemas permaneçam viáveis.

Aguiar (2017) propôs um método para priorização do tratamento de obsolescência com base não apenas em listas de peças, mas também na análise das missões a serem cumpridas pelo sistema. Este método visou a auxiliar o tomador de decisões

a reduzir o impacto de obsolescência na capacidade de cumprir missões e na disponibilidade da frota.

Considerações finais

Muitas vezes, os alunos de pós-graduação se decidem por um método antes de conhecer amiúde o problema, o cenário, as partes envolvidas, as limitações e os pressupostos operacionais. Talvez isto ocorra por ouvir falar que um determinado método funcionou muito bem em certo trabalho.

Sem conhecer profundamente o problema e sem a devida formulação matemática, fica impossível prever qual método será o mais adequado para prover uma solução ótima ou mesmo aproximada.

Algumas questões retóricas que deverão ser respondidas antes de se propor um método de solução, são:

- É possível resolver por programação linear ou inteira? Podem-se realizar testes ou recorrer à revisão bibliográfica que indique ser o problema NP (não polinomial determinístico) difícil. De qualquer forma, será preciso uma análise da complexidade com base no modelo matemático.
- Caso seja NP-difícil, seria possível aplicar uma relaxação linear (mudando-se variáveis binárias para reais) ou mesmo uma relaxação lagrangiana (colocando-se as restrições mais difíceis na função objetivo), a fim de se obter uma solução rápida e aproximada?
- E, por último, existe algum método heurístico já utilizado com sucesso para resolver o problema em questão?

Referências Bibliográficas

ABRAHÃO, F. T. M. *A meta-heurística colônia de formigas para solução do problema de programação de manutenção preventiva de uma frota de veículos com múltiplas restrições: aplicação na Força Aérea Brasileira*. 2006. 139 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 2006.

AGUIAR, Pedro Esteves de Sousa. *Metodologia para tratamento priorizado de obsolescência em sistemas aeroespaciais complexos baseada em índice de risco de material*. 2017. 154f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Aeronáutica) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2017.

ASSUMPÇÃO, Leandro da Fonseca. *Modelo de referência para avaliação de suportabilidade em aquisições de sistemas complexos de defesa, inspirado no conceito de gêmeos digitais*. 2020. 129 f. Dissertação (Mestrado em Gestão Tecnológica Espacial) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2020.

DUNCAN IMBASSAHY, Dennys Wallace. *A hybrid method to diagnose abnormal situations applied to a landing gear model*. 2020. 93f. Dissertation (Master of Science) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2020.

MARQUES, H. C.; ABRAHÃO, F. T. M.; ROCHA., G. C. Mapping Challenges Through the ILS Approach. *In. Mapping Challenges Through the ILS Approach*, [S.l.: s.n.], 2020.

MATA FILHO, José Nogueira., *et al.* An innovative method to solve the maintenance task allocation & packing problem, *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, v. 30, n. 1, p. 284-305, 2024.

MATOS, Daniela Biccas Ferraz; THOMÉ, Antonio Márcio Tavares. Problemas de Cobertura em Localização de Instalações: Uma Revisão Sistemática da Literatura. In: Anais, *SIMPÓSIO DE PESQUISA OPERACIONAL E LOGÍSTICA DA MARINHA*, Centro de Análises de Sistemas Navais, Rio de Janeiro, v. 19, 2019.

MESQUITA, A.C.P.; SANCHES, C.A.A. Air cargo load and route planning in pickup and delivery operations, *Computers & Industrial Engineering*, 2023.

PEREIRA BARRETO, Eduardo Afonso. *Modeling The Aircraft Maintenance Routing Problem For Fractional Fleets With The Inclusion Of Prognostics And Health Monitoring Information*. 2022. 88 f. Thesis (Doctor of Science in Space Sciences and Technologies Management) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2022.

SILVA, Jardel Figueira. *Aplicação de Algoritmo Genético e Programação de Metas no Problema de Planejamento de Manutenção de Aeronaves Militares*. 2018. 95f. Dissertação (Mestrado em Gestão Tecnológica) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2018.

PARTE 2

**DESENVOLVIMENTO
DA SUPORTABILIDADE**

Ferramenta para o desenvolvimento do suporte integrado do produto para sistemas aeroespaciais complexos: gêmeo digital embrionário

Talitha Cruz de Oliveira¹

Fernando Teixeira Mendes Abrahão²

A experiência da indústria mostra que, ao desenvolver as características de suporte de um novo sistema aeroespacial, as necessidades relacionadas à suportabilidade podem ser consideradas muito tarde no processo de desenvolvimento ou não ser adequadamente integradas às demais necessidades do sistema, levando a dificuldades, falta de inovação e uma série de restrições ao desempenho de suporte desses sistemas, principalmente quando estes entram em serviço e durante o restante de seus ciclos de vida. Portanto, o objetivo deste trabalho é definir e modelar, de forma gráfica e qualitativa, uma ferramenta para o desenvolvimento da suportabilidade envolvida na fase de preparação do ciclo de vida de novos sistemas aeroespaciais complexos.

A fim de manter tal ferramenta relevante e considerando o contexto atual da indústria, estabeleceu-se a necessidade de que ela seja, desde a concepção, adequada e integrável ao paradigma da Indústria 4.0, assim como às novas tecnologias a serem desenvolvidas, sendo utilizada uma abordagem baseada em

¹ E-mail: talithacruz@hotmai.com

² E-mail: abrahao@ita.br

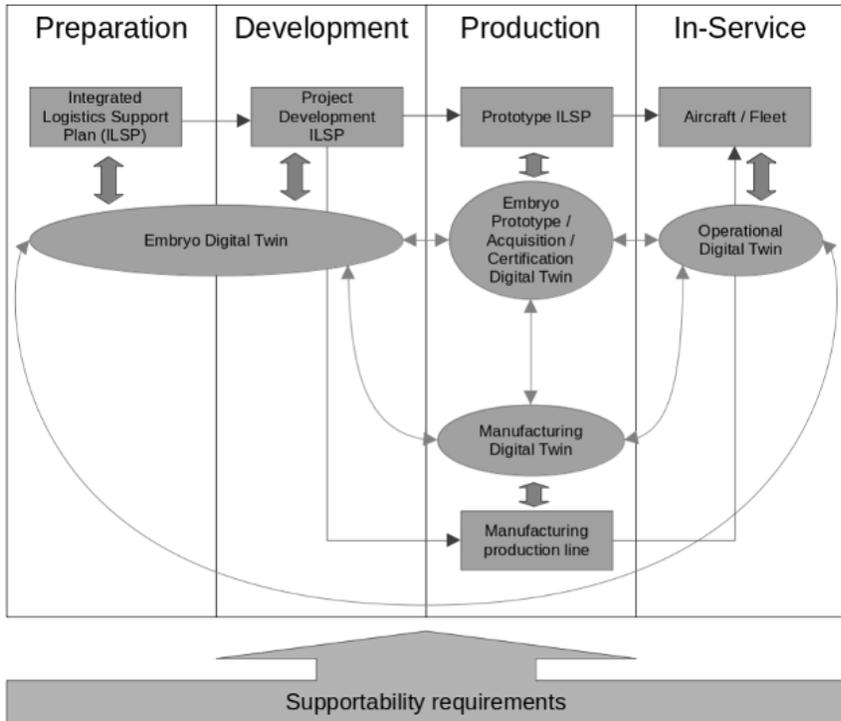
gêmeos digitais, em caráter embrionário. O procedimento seguido foi o de fornecer uma revisão das definições e classificações de gêmeos digitais observadas na literatura e compará-las às características esperadas para a ferramenta, a fim de explicar os motivos pelos quais tal abordagem foi identificada como adequada para auxiliar na tomada de decisão no ciclo de vida do suporte de sistemas aeroespaciais complexos.

Portanto, devido a suas características inerentes esperadas, decidiu-se por denominá-la como Gêmeo Digital Embrionário do processo de desenvolvimento da suportabilidade na fase de preparação de um sistema aeroespacial complexo.

Pode-se deduzir que se, durante o desenvolvimento de um novo sistema, um repositório com todo o seu conteúdo digital é criado, incluindo os motivos das decisões tomadas durante o processo, os próximos projetos poderão usar essas informações como um meio de tornar decisões em menos tempo ou para evitar retrabalho quando algum caminho percorrido foi considerado ineficaz.

Como forma de fornecer uma explicação dessa perspectiva no contexto da suportabilidade apresentado neste trabalho, pode-se imaginar um conjunto de, pelo menos, quatro gêmeos digitais, conforme apresentado na Figura 1.

Figura 1: Desenvolvimento da suportabilidade de uma estrutura conceitual de gêmeos digitais



Fonte: Adaptado de Abrahão (2021).

Para as fases Conceitual e de Desenvolvimento, o *Embryo Digital Twin*, como definido neste trabalho é alimentado com os requisitos de suportabilidade e de forma incremental fornece um “Plano de Apoio Logístico Integrado atualizado”, além de auxiliar na promoção a integração entre produto e sistema de suporte.

Em seguida, o fluxo de informações da Trilha Digital (*Digital Thread*) criado com os dados que foram alimentados, analisados e armazenados neste Gêmeo Digital pode ser usado como uma ferramenta de repositório de Gestão de Conhecimento para atualizar o Gêmeo Digital para ser usado na fase de Produção,

seja como um Gêmeo Digital do Protótipo, da Aquisição, da Certificação ou como um Gêmeo Digital do processo de Fabricação e Montagem.

A diferença entre eles está na finalidade, já que o primeiro visa entregar o Protótipo do Plano de Apoio Logístico Integrado, e, como tal, foca-se no produto que está sendo produzido e seus requisitos de suporte, enquanto o outro aspira trabalhar juntamente com a linha de fabricação, aumentando os índices de produção e minimizando atrasos administrativos e logísticos que podem impactar nesta fase.

Por fim, quando o produto aeroespacial é implantado, esse repositório de Gestão do Conhecimento é usado novamente para integrar e atualizar os Gêmeos Digitais existentes para o Gêmeo Digital Operacional, que deve ser capaz de lidar com o sistema como um todo, bem como como integrar-se com toda a frota, já que está repleto de dados de todas as outras fases que pudessem apontar necessidades de melhoria em aspectos de suportabilidade que não foram abordados anteriormente devido a algum tipo de desorientação ou mesmo mudanças nos requisitos.

Uma vez que todas as decisões do processo são armazenadas e este pode ser facilmente conectado às características reais do produto, deve ser mais fácil identificar os impactos introduzidos no desempenho da suportabilidade pela mudança de requisitos e como isso afetaria a operação, por exemplo.

É importante observar que todos os Gêmeos Digitais estão conectados e são capazes de compartilhar informações entre si, portanto, a abordagem é projetada para ser cíclica como um meio para ajudar os desenvolvedores a evitar problemas já resolvidos em outros projetos e ser capaz de decidir com base em dados e modelagem matemática.

O objetivo deste trabalho é apresentar o problema de apoio logístico e desenvolver uma abordagem capaz de auxiliar na diminuição da “Prontidão da Maturidade da Suportabilidade” (*supportability maturity readiness level* - SMRL). Este conceito foi apresentado para expor claramente o problema e as razões pelas quais as abordagens atuais são incapazes de resolvê-lo, ou seja, devido à falta de alinhamento na avaliação dos requisitos de suportabilidade dos sistemas em desenvolvimento. Para explorar o problema de apoio logístico e identificar as lacunas para abordá-lo foi realizada uma ampla revisão da literatura sobre o tema, apresentando os impactos em termos de custos ao ciclo de vida do sistema, as definições de Confiabilidade, Fatores de Disponibilidade e Manutenibilidade e a abordagem de Suporte Integrado ao Produto.

Em seguida, foi apresentado o arcabouço do Gêmeo Digital (*digital twin framework*) e seu uso foi justificado pela Paradigma da Indústria 4.0 que leva à necessidade de sistemas prontos para integração as novas tecnologias utilizadas ou em desenvolvimento. Com isso, as funcionalidades esperadas para o *Embryo Digital Twin* foram definidas e um metamodelo de alto nível foi criado para as primeiras três fases de desenvolvimento do produto.

Para aprimorar a análise, uma estrutura para o desenvolvimento conceitual (Fase de Preparação) do Suporte Integrado ao Produto unificado para o desenvolvimento geral do Sistema processo foi definido de forma gráfica (Oliveira, 2022), com base em alguns referenciais teóricos. Por fim, foi realizada uma prova de conceito para esta fase, analisando seu potencial de uso por auxiliar a tomada de decisão em alguns estudos de caso desenvolvidos, alcançando resultados como a identificação de atividades nas quais mais recursos devem ser aplicados para diminuir o tempo exigido para o seu cumprimento.

Com base nisso, pode-se concluir que o trabalho atingiu os objetivos definidos e contribui com uma visão holística do problema em questão e, da mesma forma, uma abordagem sistêmica para sua avaliação, apresentando claramente o momento em que a análise deve ser feita, o que foi identificado como o principal problema relacionado ao problema de suportabilidade. Esta abordagem também é projetada para ser integrada no contexto da Indústria 4.0 e para a Engenharia de Sistemas práticas, que podem ser descritas como outra contribuição.

Pode-se afirmar que, com a abordagem apresentada neste trabalho, os engenheiros que a utilizam poderão ter uma visão mais clara do desenvolvimento da suportabilidade integrada ao sistema ciclo de vida, para que as dependências derivadas desses requisitos possam ser levadas em consideração já na Fase de Preparação, o que também ajudaria a defender a sustentabilidade decisões amigáveis, já que a maioria das funcionalidades a serem avaliadas neste escopo não é testável ainda nesta fase.

Ao adaptar a estrutura a diferentes contextos, estimativas de alto nível sobre o processo também pode ser feito, o que pode ajudar na criação de bancos de dados relacionados à capacidade de suporte para ser usado em desenvolvimentos futuros.

Ao comparar com as abordagens comuns, a perspectiva aqui apresentada representa avança em uma maneira de alcançar lacunas SMRL menores, conectando a análise de suportabilidade a uma forma estruturada e gráfica para o ciclo de vida, especialmente para a Fase de Preparação, que impacta mais nos aspectos gerais do projeto.

Por fim, foi definida uma prova de conceito com estudos de caso, como meio de avaliar as características desta ferramenta na tomada de decisão. Como resultado e para afirmar a sua relevância, este trabalho apresenta um modelo de alto nível desta ferramenta, posicionando-a no contexto de desenvolvimento da

suportabilidade de sistemas aeroespaciais complexos na era da Indústria 4.0.

Algumas limitações foram identificadas, como discutido ao longo do trabalho, como oportunidades de melhoria do conceito e novos desenvolvimentos a serem feitos. Para abordá-los, alguns trabalhos futuros foram definidos e são apresentados a seguir:

- Validação com especialistas da indústria sobre a estrutura (*Embryo Digital Twin* - EDT) para a Fase de Preparação apresentada neste trabalho;
- Desenvolvimento de arcabouços de gêmeos digitais embrionários (*Embryo Digital Twin* - EDT) para as Fases de Desenvolvimento e Produção do Ciclo de Vida do Sistema;
- Desenvolvimento e simulação de outras funcionalidades esperadas do EDT;
- Especificação técnica do EDT;
- Aquisição de dados e população de modelos matemáticos no EDT com posterior simulação de seu comportamento e avaliação frente ao esperado;
- Integração do EDT com outras ferramentas de desenvolvimento;
- Aplicação do EDT em ambiente de desenvolvimento;
- Desenvolvimento de um Gêmeo Digital Inteligente baseado no Gêmeo Digital Embrionário.

No entanto, esta lista não pretende ser extensa e apresentar todas as possíveis aplicações ou desenvolvimentos, e sim um guia para os próximos passos esperados para esta nova abordagem.

Referências bibliográficas

- ABRAHAO, F. T. M. *et al.* Development of the AeroLogLabTOOL®. In: SIMPOSIO DE PESQUISA OPERACIONAL E LOGISTICA DA MARINHA, *Anais* [...]. Rio de Janeiro: Centro de Análises de Sistemas Navais, 2019.
- AMERICA, A. T. A. of. *MSG-3: Operator/Manufacturer Scheduled Maintenance Development*. [S.l.]: Air Transport Association of America Washington, DC, 2007.
- ASD/AIA. *International procedure specification for Logistics Support Analysis (LSA)*. 2021. Disponível em: <http://www.s3000l.org/docs/S3000L%20Issue%202.0.pdf>. Acesso em: 10 jun. 2021.
- BLANCHARD, B. S. *Logistic engineering and management*. 6. ed. New Jersey: Prentice-Hall, 2003.
- BLANCHARD, B. S.; VERMA, D. C.; PETERSON, E. L. *Maintainability: a key to effective serviceability and maintenance management*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 1995.
- BONE, M. *et al.* Toward an interoperability and integration framework to enable digital thread, *Systems, Multidisciplinary Digital Publishing Institute*, v. 6, n. 4, p. 46, 2018. BIBLIOGRAPHY 83.
- DAU, D. A. U. *Integrated Product Support Element Guidebook*. Defense Acquisition University, 2021. Disponível em: [https://www.dau.edu/pdfviewer?Guidebooks-/Integrated-Product-Support-\(IPS\)-Element-Guidebook.pdf](https://www.dau.edu/pdfviewer?Guidebooks-/Integrated-Product-Support-(IPS)-Element-Guidebook.pdf). Acesso em: 14 may 2021.
- DOD, D. of D. *DoD Guide for Achieving Reliability, Availability, and Maintainability*. [S.l.]: Department of Defense, 2005.
- DOD, D. of D. *Department of Defense Reliability, Availability, Maintainability, and Cost Rationale Report Manual*. [S.l.]: Department of Defense, 2009.

- DOD, D. of D. *Operating and Support Cost Estimating Guide*. Department of Defense, [S.d; S.l].
- FEI, T. *et al.* Twin-driven product design, manufacturing and service with big data, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Springer Nature BV, v. 94, n. 9-12, p. 3563–3576, 2018.
- GAO, U. S. G. A. *Nsiad-87477br strategic forces: Supportability, maintainability, 'readiness of the b 1 bomber'*. 1987.
- GRIEVES, M. Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication, *White paper, Florida Institute of Technology*, v. 1, p. 1–7, 2014.
- GROUP, P.-B. R.. M. S. W. *Standard: Desempenho-Based Failure Reporting, Analysis & Corrective Action System (FRACAS) Requirements (ANSI/AIAA)*.
- HASKINS, C. *et al.* Systems engineering handbook. In: *INCOSE, IEEE, Guide for information technology - system definition - concept of operations (conops) document, IEEE Std 1362-1998*, p. 1–24, 1998.
- OLIVEIRA, Talitha Cruz de. *Design of a tool for the Integrated Logistics Support development of aerospace complex systems: Embryo Digital Twin*. 2022. 87f. Dissertation (Master of Science) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2022.
- PEETERS, J.; BASTEN, R. J.; TINGA, T. Improving failure analysis efficiency by combining fta and fmea in a recursive manner, *Reliability engineering & system safety, Elsevier*, v. 172, p. 36–44, 2018.
- RUSSELL, S. H. Supply chain management: more than integrated logistics, *Air Force Journal of Logistics, US Air Force, Logistics Management Agency*, v. 31, n. 2, p. 56–64, 2007.

SCHLUSE, M.; ROSSMANN, J. From simulation to experimentable digital twins: Simulation-based development and operation of complex technical systems. In: *IEEE International Symposium on Systems Engineering (ISSE)*, [S.l.], 2016.

S-102.1. 4-2019). [S.l.]: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 2009. BIBLIOGRAPHY 84.

TAO, F. *et al.* Digital twin-driven product design framework. *International Journal of Production Research*, Taylor & Francis, v. 57, n. 12, p. 3935–3953, 2019.

TAO, F.; ZHANG, H.; LIU, A.; NEE, A. Y. Digital twin in industry: State-of-the-art, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, v. 15, n. 4, p. 2405–2415, 2018.

UN, O.; BARLAS, Y. *Discrete vs. continuous simulation: When does it matter*. In: Proceedings of the 27th international conference of the system dynamics society. [S.l.: s.n.], v. 6, p. 1–22, 2009.

USSMANN, M. *et al.* Industry 4.0: The future of productivity and growth in manufacturing industries. Boston Consulting Group, Boston, MA, USA:, v. 9, n. 1, p. 54–89, 2015.

O problema de alocação e empacotamento de tarefas de manutenção

José Nogueira da Mata Filho¹

Fernando Teixeira Mendes Abrahão²

A manutenção é considerada um dos fatores que contribuem para a produtividade de um sistema complexo, sendo importante para garantir que sistema possa operar com segurança, desempenho operacional adequado com o menor custo possível durante todo o seu ciclo de vida. Sistemas complexos devem, portanto, realizar manutenção preventiva (MP) para minimizar a chance de falhas inesperadas, restaurar a funcionalidade e desempenho enquanto maximiza disponibilidade e minimiza custos.

A necessidade de executar manutenção preventiva surge do fato de que todo sistema complexo está sujeito a falhas. A falha é definida como a incapacidade de atuar em limites especificados ou a incapacidade de realizar sua função definida durante o projeto (Kinnisson, 2004). É um fenômeno que pode ser causado por desgaste ou fadiga devido à utilização, ou envelhecimento natural de algum componente do sistema.

Falhas também podem ser por danos acidentais, que podem ser introduzidos pelas atividades de operação e manutenção, e danos ambientais, causados pela exposição do sistema a ambientes adversos, podem dar início ao processo de falha. De forma geral, a falha é considerada o efeito final de um modo de falha, resultando

¹ E-mail: noguefilho@ita.br

² AeroLogLab-ITA (www.aerologlab.ita.br). E-mail: abrahao@ita.br

em uma incapacidade funcional do sistema. Deve-se ter um bom entendimento sobre o processo de falha, ou seja, como o item falha em desempenhar sua função, qual o efeito e consequência da falha, e qual o padrão de degradação ou de falha, para se definir a melhor estratégia de manutenção.

Caso não exista uma estratégia eficiente de manutenção preventiva, pode-se optar em submeter-se a falha, que irá resultar em manutenções corretivas, ou fazer o reprojeto do sistema se as consequências da falha na operação e segurança assim exigirem. Isso porque, manutenção preventiva na forma de tarefas programadas ou dependente de alguma condição específica, ou seja, disparada por sistemas de prognósticos, predição ou baseada no monitoramento da condição, são normalmente mais vantajosas e menos onerosas do que as ações de manutenção corretiva.

A manutenção corretiva, dependendo de onde e como aconteça, implica uma maior quantidade de horas para avaliação, programação e resolução da falha. Além de um maior tempo para disponibilização de material, podendo levar a um aumento de tempo e custos relacionados. Na aviação comercial, a aeronave fora de operação pode levar a uma perda de oportunidade de cerca setenta mil dólares por dia (Senturk; Ozkol, 2018), além das perdas adicionais com estadias, refeições, e reprogramação de passagens.

Uma eficiente manutenção preventiva (MP) irá utilizar a melhor forma de minimizar a necessidade de manutenção corretiva e o tempo do sistema fora de operação (do inglês *downtime*), aumentando assim a disponibilidade e a relação custo-benefício.

No caso da aviação ou de um sistema comercial, um melhor desempenho significa uma melhor lucratividade. Por outro lado, no ramo de defesa, o melhor desempenho está relacionado a prontidão para o cumprimento das missões.

Dessa forma, a manutenção de sistemas complexos pode ser considerada um problema de tomada de decisão com diversos atributos, incluindo segurança, tempo indisponível, atrasos logísticos, custos, recursos disponíveis, entre outros. Na indústria aeronáutica, a segurança, o desempenho operacional e os objetivos de custo são diretamente afetados pelas estratégias de manutenção preventiva estabelecidas durante o desenvolvimento do produto.

Ressalta-se aqui que, por definição, a manutenção “inclui todas as ações necessárias para manter um sistema ou produto ou restaurá-lo para um estado operacional desejado” (Blanchard, 2016). Isto é, o objetivo da manutenção é restaurar o sistema para o nível de desempenho inerente de projeto, não tendo capacidade de aumentá-lo (Moubray, 1997).

Dois fatores de projeto têm influência direta na eficiência de manutenção e dos outros elementos da suportabilidade do produto. O primeiro fator é a Confiabilidade, que está relacionada a probabilidade de ocorrência de falhas. O segundo fator é a manutenibilidade, que define o grau de facilidade ou não de se executar as tarefas de manutenção.

O programa de manutenção inicial para uma nova aeronave é normalmente elaborado conforme a metodologia de manutenção centrada na Confiabilidade (do inglês *Reliability-Centered Maintenance* - RCM). RCM é um processo usado para determinar os requisitos de manutenção de qualquer ativo físico em seu contexto operacional (BASSON AND THE ALADON NETWORK, 2019). Atualmente, a indústria aeronáutica utiliza a metodologia MSG-3 (do inglês *Maintenance Steering Group - 3rd version*) o qual é uma evolução da primeira edição do manual do grupo MSG, que por sua vez representa uma evolução do RCM, e inclui todas as lições aprendidas pelos grupos de trabalho durante mais de 40 anos.

A Figura 1 apresenta um esquema simplificado do processo de desenvolvimento do plano de manutenção necessário para

manter a aeronavegabilidade da aeronave. Os requisitos iniciais de manutenção para uma nova aeronave comercial são derivados dos processos de certificação de tipo (do inglês *Type Certification - TC*) e do comitê de revisor de manutenção (do inglês *Maintenance Review Board - MRB*).

Os requisitos originados pelo processo TC visam a manter o nível de segurança inerente definido no projeto de tipo durante toda a vida operacional. Esses requisitos são considerados limitações do TC sendo derivados de diferentes análises de segurança. Paralelamente à certificação, ocorre o desenvolvimento dos requisitos mínimos iniciais de manutenção conforme o processo e as regras do MRB, que tem o objetivo de garantir a aeronavegabilidade continuada das aeronaves. Além da segurança, o processo MRB avalia as consequências operacionais e econômicas das falhas.

As diretrizes do processo de desenvolvimento do programa de manutenção programada da indústria aeronáutica estão no documento AC-121-22 (C) (FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION, 2012). As instruções estabelecem o uso da metodologia MSG-3.

A metodologia MSG-3 abrange procedimentos e diretrizes para análise de manutenção de sistemas, estruturas, zonas e proteções contra raios e campos de irradiação de alta intensidade (do inglês *Lightning and High Intensity Radiated Frequency - L/HIRF*).

O plano de manutenção resultante é apresentado na publicação de Dados do Planejamento de Manutenção (do inglês *Maintenance Planning Data - MPD*) e inclui, entre outras informações, a frequência das tarefas manutenção programadas necessárias para a aeronave poder atender, tanto às expectativas de desempenho dos usuários, quanto os requisitos de aeronavegabilidade.

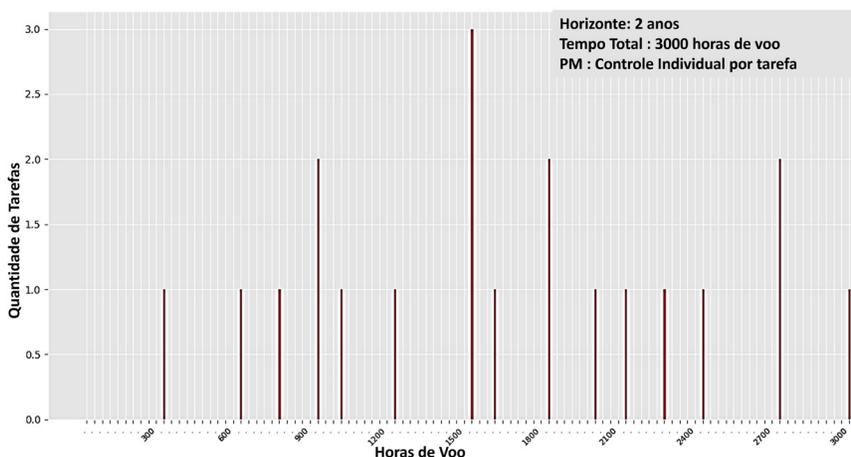
Quadro 1: Requisitos de manutenção programada

Componentes	Intervalo	Homem-horas	Tempo
Gerador Elétrico	1000	2,63	1,315
Bomba de Combustível	900	3,28	1,64
Bateria Principal	300	2,77	2,77
Bomba de Ejeção	1500	3,8	3,8
Bomba Hidráulica	750	4,6	4,6
Motor	1600	11,06	5,53

Fonte: Filho e Abrahão (2024).

Uma alternativa seria a de tentar utilizar o limite de tempo de utilização segura de cada componente da aeronave (veja a Figura 2).

Figura 2: Distribuição de paradas - controle individual



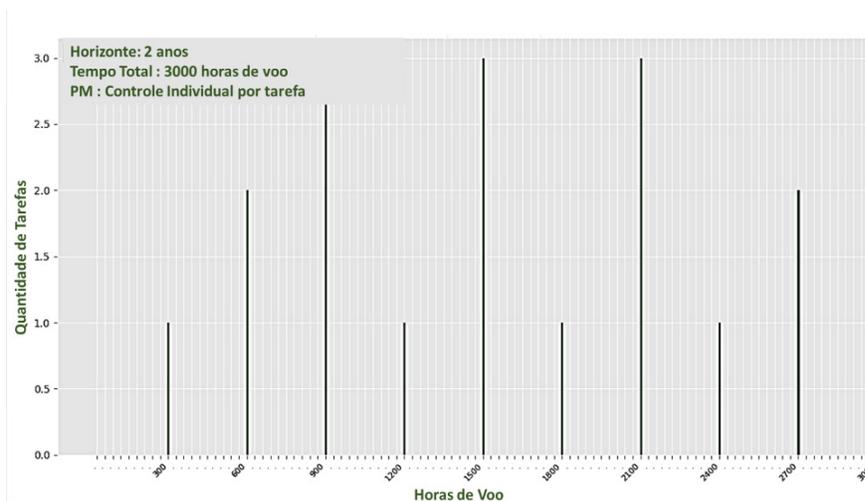
Fonte: Mata Filho e Abrahão (2024).

Nesse caso, o plano de manutenção priorizaria a utilização máxima segura de cada componente, evitando o desperdício de horas utilizáveis. No entanto, o plano de manutenção teria que estabelecer um controle para cada item e suas respectivas tarefas de manutenção preventiva.

Assim, devido às características probabilísticas da falha, pode-se ficar mais exposto à ocorrência de falhas em momentos inoportunos, podendo causar o aumento da indisponibilidade e dos custos associados à indisponibilidade.

Outra alternativa seria a de tentar combinar uma série de tarefas de manutenção para serem realizadas em uma única parada da aeronave, a despeito de eventuais perdas de horas de voo disponíveis de alguns componentes (Figura 3).

Figura 3: Controle por pacotes de manutenção



Fonte: Mata Filho e Abrahão (2024).

Esta alternativa, chamada de empacotamento (do inglês *packing*), produz menos pacotes de trabalho (do inglês *working*

packages) relativamente extensos, e requer um tempo de indisponibilidade da aeronave relativamente maior para sua realização. Possivelmente pode antecipar a execução de itens fora de fase (OOP – *Out of Phase*, fora do pacote de manutenção) e itens controlados (itens que requerem maior atenção). Entretanto, permite um melhor planejamento das atividades e recursos, e menor risco de paradas adicionais para incorporação de modificações oriundas de boletins de serviços (do inglês *Service Bulletin*) e diretrizes de aeronavegabilidade (do inglês *Airworthiness Directives*), bem como reparos.

Quanto à qualidade, tem-se um maior tempo para correções de defeitos. A definição da melhor estratégia de alocação de tarefas de manutenção está diretamente ligada ao conceito de manutenção do operador, localização e disponibilidade de recursos, e demandas do setor de que controla as operações.

O desafio do setor de manutenção é atender toda demanda da operação com aeronaves em condições aeronavegáveis. O melhor Plano de Manutenção (PM) possível, é aquele que atende aos objetivos da manutenção com uma ótima relação custo-benefício via uma combinação adequada das diversas parcelas de custos e de ganhos devido ao empacotamento e ao sequenciamento das tarefas.

O Plano de Manutenção (PM) é considerado um documento dinâmico que deve ser avaliado e atualizado continuamente com base nos dados de desempenho e experiência de operação da frota, considerando as condições e ambientes operacionais. Essa atualização torna o PM mais resiliente e permite uma melhor aderência a curva de maturidade dos indicadores de suportabilidade.

A Figura 1 apresenta resumidamente os processos de coletar e analisar dados produzidos pelas atividades de manutenção e operação, e verificar as oportunidades de melhoria. As atividades de atualização devem seguir os parâmetros estabelecidos

para o sistema complexo analisado, tais como quantidade de atividades de manutenção executadas (preventivas e corretivas) e as respectivas horas de voo, achados (do inglês *findings*) da manutenção preventiva.

Na aviação comercial, e opcionalmente na aviação militar, são utilizadas as orientações da circular AC-121-22 (C), ou equivalente da ANAC, e baseia-se em dados de desempenho e experiência para frotas de modelos específicos operados sob uma variedade de condições e ambientes operacionais. A norma segue uma análise estatística, estabelece requisitos de para cálculo do tamanho da amostragem e dos dados de execução de tarefas preventivas e corretivas a fim de garantir um nível de confiança de no mínimo 95% nas análises.

Definição do problema

O problema são as lacunas encontradas no processo de desenvolvimento de planos de manutenção, como a ausência de modelo e ferramentas pouco eficientes, que apresentam incoerências para a obtenção da melhor relação benefício/custo. O desafio é como encontrar um plano de manutenção que seja ótimo, ou muito próximo do ótimo, e que considere todas as medidas de desempenho relevantes para a melhor relação custo-benefício de suporte possível.

O problema pode resultar em ineficiências na manutenção e operação do produto, ou seja, mais oneroso do que poderia ser e com índices de disponibilidade menor do que o possível de ser atingido. É desejável que a alocação das tarefas considere todos os aspectos relevantes dos conceitos de operação e manutenção para minimizar os custos totais de manutenção e maximizar a disponibilidade da frota com base no real cenário de utilização do produto.

A intenção deste capítulo é apresentar o trabalho de tese de doutorado visando o desenvolvimento e teste de um modelo para melhorar a acurácia dos cálculos na geração de planos de manutenção. Em resumo, a tese considera o efeito do empacotamento, a probabilidade de falhas e a capacidade de atualização contínua do PM consoante os resultados das execuções das tarefas de manutenção. A utilização do modelo poderá fornecer uma ótima relação disponibilidade/custo do sistema sem comprometer segurança, atendendo assim, os requisitos das autoridades e às necessidades dos clientes.

Embasamento teórico e hipótese(s)

Manutenção é o processo de garantir que um sistema executa continuamente sua função pretendida em seu projetado em nível de Confiabilidade e segurança (Kinnison, 2004). Inclui todas as ações necessárias para reter um sistema ou produto em, ou restaurá-lo para, um desejado estado operacional (Blanchard, 1995). De acordo com para (Marquez, 2007), A retenção e restauração são denominações que podem levar a dois tipos principais de manutenção: preventiva programada e não programada corretiva. A manutenção preventiva inclui todas as ações de manutenção executadas, em intervalos especificados, para manter um sistema ou produto em uma operação especificada. Assim, no sistema aeronáutico, assegurar a aeronavegabilidade continuada. O PM inclui a tarefas para prevenção de falhas, identificação de falha potencial e descoberta de falhas ocultas para evitar a deterioração do nível inerente de Confiabilidade do sistema (*AIRLINES FOR AMERICA*, 2015).

Revisão da literatura

Em relação ao problema de utilização de métodos ineficientes (incompletos) e falta de dados podemos observar, com base na revisão da literatura e na experiência na aplicação da metodologia MSG-3, que existem várias oportunidades para aprimorar a metodologia de definição de tarefas e intervalos de manutenção. O estudo de Ahamadi (2010) lista algumas áreas potenciais que poderiam ser melhoradas no MSG-3, variando do modo de falha inicial e análise de efeito (FMEA) até o intervalo da tarefa critério de seleção.

Além disso, a definição do intervalo da tarefa durante o Relatório do Comitê de Revisão de Manutenção (MRBR) é apontado por Liu (2006) como processo que depende principalmente na experiência de engenharia em aplicações semelhantes. Essa dificuldade para definir o intervalo da tarefa também é destacada no documento MSG-3, onde é assumido que os intervalos iniciais devem ser baseados nos dados disponíveis e um “bom julgamento de engenharia”, o que denota um certo grau de imprecisão.

O foco deste estudo é o problema de alocação de tarefas (TAPP) onde a ausência de um modelo que seja capaz de considerar parâmetros importantes e fundamentais para a definição do programa de manutenção do cliente trazem resultados muito conservativos e abaixo das expectativas. Normalmente, são considerados alguns parâmetros, como o intervalo, mão de obra e tarefas de preparação, mas sem o objetivo de otimização. Outros parâmetros fundamentais para geração de um programa otimizado, probabilidade de falhas, custos das ações preventivas e corretivas, custos de oportunidade, e possíveis ganhos devido ao empacotamento de tarefas que partilham os mesmos acessos e preparações, não são consideradas.

A revisão da literatura mostra que vários autores abordam o problema de programação de manutenção (Abrahão; Gualda,

2006), ou o problema conjunto de programação de manutenção e voo (FMP), (Shah *et al.*, 2017), (Bozoudis *et al.*, 2018), (Balakrishnan *et al.*, 2021). Esses problemas dependem de algum modo dos resultados da alocação de tarefas de manutenção. Diretamente relacionados ao problema de alocação de tarefas (TAPP) a literatura apresenta trabalhos que abordam parte do problema, mas não consideram todos os fatores inerentes ao problema, conforme apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Revisão da literatura envolvendo o problema

Approach by	Objectives		Methods		Features			
	Min Cost	Max Avail	IP	Heu	Life phase	Op Cost	Prob CM	Packing gain
[Muchiri <i>et al.</i> (2009)]	■	.	.	□	O	.	.	□
[Holzel <i>et al.</i> (2012)]	■	.	■	□	O	□	.	.
[Li <i>et al.</i> (2015)]	■	.	.	■	O	.	.	□
[Senturk <i>et al.</i> (2018)]	□	■	.	□	O	.	.	.
[Witteman <i>et al.</i> (2021)]	■	■	.	■	O	.	.	□
[Lee <i>et al.</i> (2022)]	■	.	■	□	O	.	■	□
This work	■	■	■	■	D+O	■	■	■

■ completely □ partially O operational D development

IP integer programming Heu heuristics

Fonte: Mata Filho e Abrahão (2024).

Especificação do problema

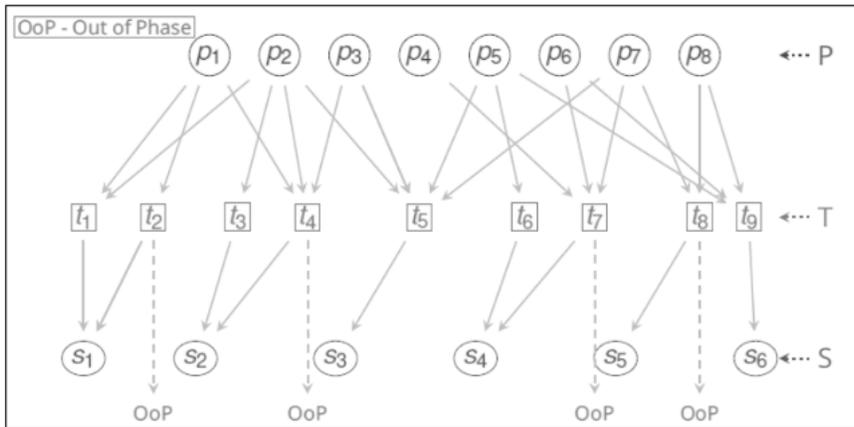
O problema consiste em alocar um conjunto de tarefas preventivas $T = \{1, 2, 3 \dots |T|\}$ em um dos diversos pacotes (paradas) de manutenção $S = \{1, 2, 3 \dots |S|\}$ que ocorrem a intervalos S_i durante a fase de operação e suporte da aeronave (Figura 4).

Cada tarefa T_j tem seu intervalo máximo, max_j , definido com base nas características de falha e degradação dos componentes

$C = \{1,2,3 \dots |C|\}$ objeto da tarefa de manutenção. Desse modo, a tarefa T_j somente poderá ser inserida em um pacote onde intervalo $S_i \leq j_{max}$.

Para a execução de uma tarefa podem ser necessárias atividades preparatórias, tais como posicionamento e configuração da aeronave, abertura e fechamento de acessos, energização da aeronave e outras. Essas atividades são elementos do conjunto de preparações $P = \{1,2,3,\dots,|P|\}$ e podem ser compartilhadas por várias tarefas.

Figura 4: Problema de alocação de tarefas (TAPP)



Fonte: Mata Filho e Abrahão (2024).

A tese baseia-se em duas hipóteses: minimizar custos devido ao agrupamento e sequenciamento de tarefas em torno de recursos ou preparações comuns (H1); aprimorar a minimização de custos explorando proativamente os dados históricos de manutenção (H2).

Aplicação da metodologia

Formulação do Problema

A estratégia de otimização envolve a alocação de tarefas em pacotes flexíveis e pode manter algumas tarefas fora dos pacotes (do inglês *Out of phase*) que deverão ser controladas individualmente. O modelo considera os seguintes componentes de custos calculo: (1) o custo da tarefa preventiva, (2) o custo da tarefa corretiva relacionado à probabilidade de eventos de falhas, (3) o custo da antecipação de tarefas empacotadas antes do limite máximo de horas de voo, (4) o custo da perda de receita devido à parada da aeronave (custo de oportunidade), O modelo considera ainda a economia devido à inclusão de tarefas que compartilham as mesmas atividades de preparação na mesma parada de manutenção.

Resumidamente, o modelo denota a variável $x_{ij} = 1$ se a tarefa T_j é alocada no pacote de manutenção S_i e $x_{ij} = 0$ em caso contrário. O modelo busca no espaço de soluções o melhor pacote S_i para alocação da tarefa T_j a fim de minimizar a função custo abaixo:

$$\text{Min} \sum_{i=1}^{|S|} \sum_{j=1}^{|T|} x_{ij} * (pmtc + cmtc + prptc) \quad (1)$$

$pmtc$ e $cmtc$ representam os custos totais de manutenção preventiva e manutenção corretiva respectivamente, e incluem custo de mão de obra, material e o custo de oportunidade devido ao tempo de parada (do inglês *downtime*). E a parcela $prptc$ é o custo de preparações das atividades de manutenção e, inclui o desconto relativo ao empacotamento de tarefas que utilizam as mesmas preparações.

Sujeito as seguintes restrições:

$$\sum_{i=1}^{|S|} x_{ij} = 1 \quad (2)$$

Assegura que cada tarefa será alocada em apenas um pacote de manutenção periódica.

$$\sum_{i=1}^{|S|} x_{ik} \leq 1 \quad (3)$$

Garante que a tarefa de preparação P_k será considerada apenas uma vez no pacote de manutenção S_i.

$$\sum_{i=1}^{|S|} x_{ij} \geq \lfloor \frac{stop_i}{lim_j} \rfloor \quad (4)$$

Essa restrição estabelece que o número de tarefas deve ser pelo menos a razão entre o tempo máximo de parada e o tempo limite para executar a tarefa. Isso garante que cada tarefa não seja executada depois do seu limite de operação lim_j.

Após a definição do empacotamento ótimo, o modelo ainda elabora o sequenciamento da execução das tarefas no pacote, de modo a diminuir o tempo de parada e otimizar a disponibilidade da aeronave. Além do tempo de parada, são considerados o relacionamento entre as tarefas e as limitações de espaço nas zonas e acessos requeridos pelas tarefas.

Para execução dos testes com o modelo para solução do

problema de empacotamento (TAPP), utilizou-se o método "Branch-and-Cut", desenvolvido e mantido por Forrest *et al.* (2020) e incluído no resolvidor de Programação Inteira Mista (MIP) do *Python*, e dados sintéticos de tarefas baseados em informações reais de uma aeronave comercial.

Na otimização do sequenciamento das tarefas é utilizado o método *First-Fit-Decreasing* (FFD), que considera a alocação das tarefas em espaços criados pelo modelo em ordem decrescente de tempo de parada (Johnson, 1973). Esses espaços são flexíveis, podendo ser descartados se não foram utilizados.

A figura abaixo mostra o algoritmo resumido que implementa o modelo de otimização.

Figura 5: Algoritmo de otimização

```

Algorithm 1 Otimização()
1: Iniciliza()  $\leftarrow (H, CMF, OCD)$ 
2:  $C \leftarrow getComponents()$ 
3:  $T \leftarrow GenerateTask(c.mat, c.mh, c.man, c.\lambda, c.fh, c.preps)$ 
4:  $S \leftarrow GeneratePackages(H, c.lim)$ 
5:  $MC, DT \leftarrow 0, 0$ 
6:  $mod \leftarrow Model(CoINORCBC)$ 
7:  $X_{ij} \leftarrow [] \cdot n \cdot t$ 
8:  $fh_j \leftarrow lim_j$ 
9:  $ns \leftarrow NS$ 
10:  $F(fh_j) \leftarrow \lambda_j \cdot (stoppage_i)/2$ 
11:  $pmtc \leftarrow \sum X_{ij} \cdot pmc_j + pmoc_j + cost_j \cdot (\lceil \frac{stop_i}{fh_j} \rceil - \frac{stop_i}{fh_j})$ 
12:  $cmtc \leftarrow \sum X_{ij} \cdot (F(fh_j)) \cdot CMF \cdot (pmc_j + pmoc_j)$ 
13:  $prptc \leftarrow \sum_{i,s} \cdot preps_i$ 
14:  $X_{ij} \leftarrow mod.minimize(pmtc + cmtc + prptc)$ 
15:  $st1 \leftarrow \sum_i X_{i,j} \geq \lfloor \frac{n_i}{k} \rfloor$ 
16: for  $i \in S$  do
17:   for  $j \in T$  do
18:     if  $X_{ij} = 1$  then
19:        $pmtc \leftarrow \sum [pmc_j + pmoc_j + cost_j \cdot (\lceil \frac{stop_i}{fh_j} \rceil - \frac{stop_i}{fh_j})]$ 
20:        $cmtc \leftarrow \sum (F(fh_j)) \cdot CMF \cdot (pmc_j + pmoc_j)$ 
21:        $MC \leftarrow MC + pmtc + cmtc$ 
22:       if  $prep_k \notin preps_i$  then
23:          $preps_i \leftarrow preps_i \cup prep_k$ 
24:          $MC \leftarrow MC + prep_k.cost + prep_k.oc$ 
25:          $DT \leftarrow DT + pmdt_j + F(fh_j) \cdot CMF \cdot pmdt_j$ 
26:  $A \leftarrow \frac{H-DT}{H}$ 
27: Return  $MC, A$ 

```

Fonte: Mata Filho e Abrahão (2024).

Algumas observações sobre os passos do pseudo código:

- **Linha 1:** Inicializa os parâmetros de testes como o horizonte de cálculo (H), custos diário de não operação (OCD), e fator de manutenção corretiva(CMF).
- **Linha 2:** Carrega os dados dos componentes.
- **Linha 3:** Gera dados das tarefas de cada componente.
- **Linha 4:** Dimensiona a quantidade e intervalos dos pacotes de manutenção com base no tempo de operação e limites de intervalo das tarefas.
- **Linha 5:** Inicializa parâmetros de custos e "downtime".
- **Linha 6:** Define o método de otimização (*Coin Branch and Cut*).
- **Linha 7:** Cria as variáveis binárias de decisão.
- **Linha 10:** Define a equação da taxa de falha do item em função do intervalo do pacote.
- **Linha 11:** Modela os custos de manutenção preventiva.
- **Linha 12:** Modela os custos de manutenção corretiva.
- **Linha 13:** Calcula os custos das preparações incluídas no pacote de manutenção.
- **Linha 14:** Inicia o resolvedor para procura de uma solução ótima.
- **Linha 15:** Verifica se existe uma solução encontrada pelo resolvedor.
- **Linha 16:** Calcula os custos de manutenção preventiva e corretiva da solução encontrada.
- **Linha 24:** Calcula os custos de preparação considerando o aproveitamento das preparações em comum.
- **Linha 25:** Calcula a soma dos tempos totais gastos em cada parada.
- **Linha 26:** Calcula a disponibilidade em função do tempo em operação e o tempo parado para manutenção.
- **Linha 27:** Retorna os valores encontrados.

Resultados e discussão

O modelo de otimização passou por testes de validação até efetuar os testes com um número maior de componentes e parâmetros, tendo apresentados os resultados esperados tanto em termos de sensibilidade as mudanças de parâmetros e ganhos esperados. O efeito do empacotamento mostrou-se eficaz desde os testes iniciais, onde apresentou uma redução de 2,14 % nos custos quando utilizado o modelo (veja Figura 6).

Figura 6: Ganhos do empacotamento

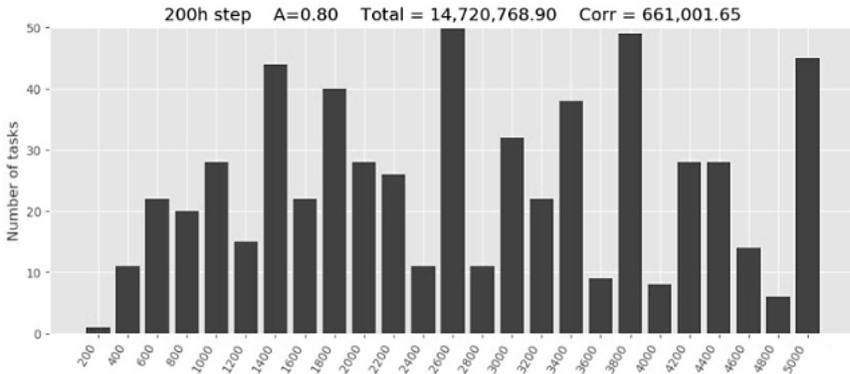


Fonte: Mata Filho e Abrahão (2024).

Até o momento os diversos testes efetuados demonstram ganhos tanto em termos de custos e diminuição da probabilidade corretivas, implicando além do ganho em custos uma melhor disponibilidade. Abaixo tem-se os resultados do teste desenvolvido com dados de tarefas de 794 itens gerados sinteticamente tendo como base itens similares utilizados na aviação comercial.

A Figura 7 apresenta os resultados de um empacotamento utilizando-se apenas o melhor julgamento de engenharia sem a otimização.

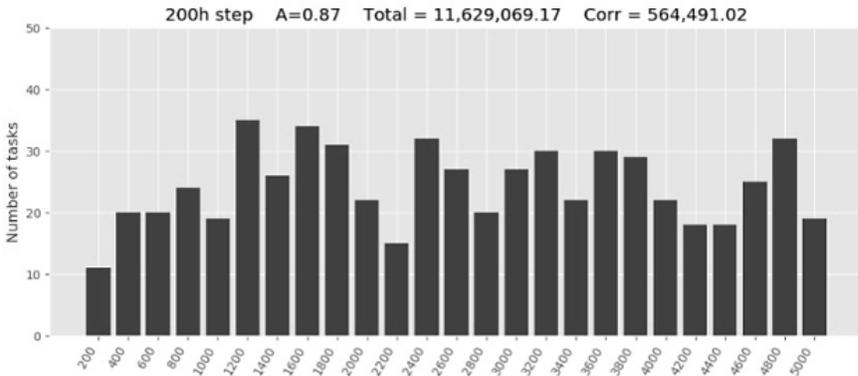
Figura 7: Teste não otimizado



Fonte: Mata Filho e Abrahão (2024).

A figura 8 apresenta os resultados encontrados pelo resolvidor.

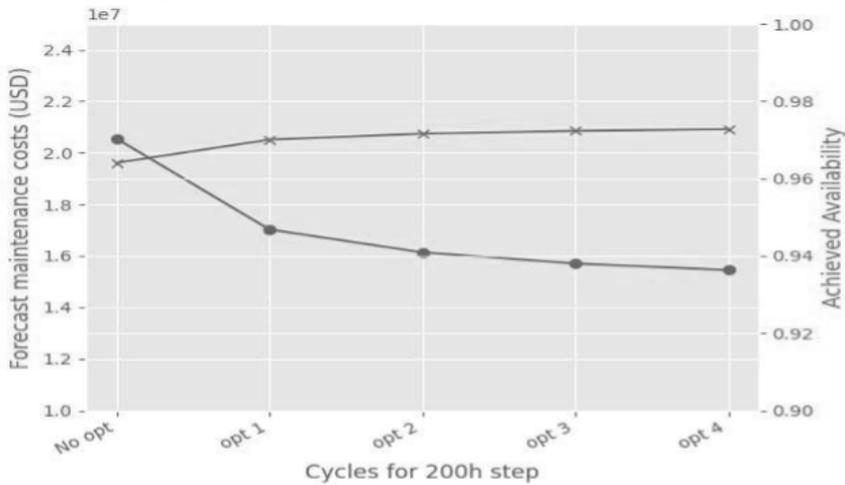
Figura 8: Teste com o modelo otimização



Fonte: Mata Filho e Abrahão (2024).

Os resultados demonstram, em um horizonte de 5000 horas de voo, um ganho de 8,39% no custo total de manutenção e de 8,75% na disponibilidade da aeronave, o que comprova a hipótese H1. Além desses ganhos, espera-se também ganhos adicionais inerentes a redução do tempo total de parada da aeronave para manutenção com a inclusão da otimização do sequenciamento de tarefas baseado no relacionamento entre tarefas, acessos e disponibilidade de recursos.

Figura 9: Evolução do plano de manutenção



Fonte: Mata Filho e Abrahão (2024).

A Figura 9 mostra os efeitos da atualização do plano original em função de uma nova rodada de otimização com base nos resultados simulados da execução da manutenção. O modelo confirma que o plano pode ser melhorado com a exploração dos dados históricos durante os ciclos de manutenção. Isso confirma H2.

Conclusão

O trabalho apresentado neste capítulo tratou do desenvolvimento de um modelo que resolve o problema de alocação e empacotamento de tarefas de manutenção. Foi considerado o cenário de desenvolvimento do plano de manutenção que será utilizado pelo operador da aeronave no seu programa de manutenção a ser aprovado pela autoridade local.

No modelo matemático desenvolvido foram considerados todos os custos inerentes a manutenção preventiva e a manutenção corretiva, incluindo os custos de oportunidade devido a indisponibilidade da aeronave e a economia em função do

empacotamento de tarefas que compartilham os mesmos acessos e preparações. O modelo considera ainda a probabilidade de ocorrência de falhas entre os intervalos de manutenção preventiva para a minimização dos custos de corretiva. Tais fatos evidenciam o aprofundamento no entendimento do problema do desenvolvimento de planos de manutenção preventiva que otimizem a relação custo benefício dos respectivos produtos (aeronaves).

O intervalo da tarefa é considerado uma restrição dura que estabelece o limite máximo de tempo para execução da tarefa, assim, a tarefa só poderá ser alocada em pacotes cujo intervalo seja menor que o intervalo da tarefa. A disponibilidade de recursos em cada especialidade e a capacidade física da zona tão são consideradas no modelo de otimização.

Para resolução do modelo foi utilizado o algoritmo de Ramo e Corte (do inglês *Branch and Bound*), que é um método exato de solução, capaz de obter a resposta ótima para o problema e assim alocar as tarefas no melhor pacote de acordo com o espaço de solução disponíveis e restrições do problema. Para o sequenciamento de execução das tarefas dentro do pacote objetivando uma melhor disponibilidade, foi utilizado o conceito de compartimentos (do inglês *Bins*), e o algoritmo *First-Fit Decreasing* (FFD) que primeiro ordena os itens do maior para o menor e os distribui em cada espaço disponível de cada compartimento. No caso da tese, minimiza o número de compartimentos de tarefas, minimizando o tempo do pacote de trabalho, aumentando a disponibilidade.

O plano inicial de manutenção otimizado necessita ser atualizado constantemente de acordo com evolução dos dados de Confiabilidade e manutenibilidade durante a fase de desenvolvimento ou com os dados de execução das tarefas e desempenho operacional na fase de operação e serviços de forma que o plano de manutenção seja resiliente as mudanças de cenários e parâmetros.

Neste sentido, foram efetuados estudos sobre o uso de aprendizado de máquina para análise de alguns dados simulados de execução da manutenção, que apresentaram os resultados que indicam a sua utilização no acompanhamento do plano. Não foi possível a aplicação em um caso real, mas o uso do ML poderá auxiliar nas análises de revisão do plano de manutenção, se necessário, e nas previsões de custos para as próximas paradas de manutenção.

O resultado esperado é um plano de manutenção inicial eficiente e resiliente ao longo de todo o ciclo de vida dos sistemas.

A contribuição deste trabalho é a exploração de um modelo inovador para definição de estratégias otimizadas para manutenção de sistemas complexos, através da integração e consideração de diferentes dados de manutenção e operação. O resultado esperado é um plano de manutenção inicial mais preciso, eficiente e resiliente ao longo de todo o ciclo de vida dos sistemas.

Os trabalhos futuros esperados em decorrência deste estudo incluem a integração do modelo de otimização com ferramentas de planejamento de voo e manutenção (FMP), bem como a integração com os dados das análises MSG-3 e análise de manutenibilidade. Espera-se também a integração com a utilização dos dados de prognósticos e monitoramento da saúde do sistema (do inglês *Prognostic Health Monitoring*).

Referências bibliográficas

ABRAHÃO, F. T. M., and N. D. F. GUALDA. Meta-heurística colônia de formigas para solução do problema de programação de manutenção preventiva de frotas de veículos, *Paper presented at the XIV Pan-American Conference of Traffic and Transportation Engineering*, Las Palmas de Gran Canaria, p. 20–23, 2006.

AHMADI, A., U. KUMAR, and P. SÖDERHOLM. On aircraft scheduled maintenance program development", *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, v. 16, n. 3, p. 229–255, 2010. doi:10.1108/13552511011072899.

AIRLINES FOR AMERICA. 2015. MSG-3: Operator/manufacturer scheduled maintenance development. <https://publications.airlines.org/CommerceProductDetail.aspx?Product=278>.

BALAKRISHNAN, N., M. SHAH, K. R. ANUPAMA, and N. SHARMA. Optimisation of flight and maintenance planning for defence aviation with modified artificial bee colony algorithm, *Defence Science Journal*, v. 71, n. 1, p. 3–11, 2021. doi:10.14429/DSJ.71.16043.

BASSON, M., & The Aladon Network. *RCM3: Risk-based Reliability Centered Maintenance*. New York, NY: Industrial Press, Inc, 2019.

BLANCHARD, B. S., VERMA, D. C., & PETERSON, E. L. *Maintainability: A Key to Effective Serviceability and Maintenance Management*. 1. ed. Wiley-Interscience, 1995.

BLANCHARD, B. S., and J. BYLER. *System Engineering Management*. 5. ed. New York, NY: Wiley, 2016.

BOZLOUDIS, M., LAPPAS, I. & KOTTAS, A. Use of Cost-Adjusted Importance Measures for Aircraft System Maintenance Optimization, *Aerospace*, v. 5, p. 68 2018.

- FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION. *FAA AC 121-22: Maintenance review boards, maintenance type boards, and OEM/TCH recommended maintenance procedures*. FAD, 2012. Disponível em: <https://www.faa.gov/documentLibrary/media/AdvisoryCircular/AC121-22C.pdf>. Acesso em: jun. 2021.
- FIRESMITH, D. *System resilience: What exactly is it?* 2019. Disponível em: <https://insights.sei.cmu.edu/blog/system-resilience-what-exactly-is-it/>. Acesso em: jun. 2021.
- FORREST, J. J. *et al.* *Coin-or/Cbc: Version 2.10.5*, Zenodo, 2020. doi:10.5281/zenodo.3700700.
- HOLZEL, N. *et al.* A Maintenance Packaging and Scheduling Optimization Method for Future Aircraft. In: *Collins Aerospace*. [S.l.: s.n.], p. 11, 2012.
- JOHNSON, D.S. Near-optimal bin packing algorithms, Johnson, D.S., Garey, M.R., 1985. A 7160 theorem for bin packing, *Journal of Complexity*, v. 1, p. 65–106, 1973.
- KINNISON, H. A. *Aviation Maintenance Management*. New York, NY: McGraw-Hill, 2004.
- LEE, J.; PATER, I. D.; BOEKWEIT, S.; MITICI, M. Remaining-Useful-Life prognostics for opportunistic grouping of maintenance of landing gear brakes for a fleet of aircraft, Collins Aerospace, [n.d]. *PHM Society European Conference*, v. 7, n. 1, p. 278–285, 2022.
- LI, H., H. ZUO, D. LEI, K. LIANG, and T. LU. 2015. Optimal combination of aircraft maintenance tasks by a novel simplex optimization method. *Mathematical Problems*. In: *Engineering*, 2015. doi:10.1155/2015/169310.

LIU, M., H. F. ZUO, X. C. NI, and J. CAI. Research on a case-based decision support system for aircraft maintenance review board report. *In: ICIC'06: Proceedings of the 2006 International Conference on Intelligent Computing – Volume Part I*, 1030–1039, 2006. doi:10.1007/11816157_125.

MÁRQUEZ, A. C. *The Maintenance Management Framework: Models and Methods for Complex Systems Maintenance*, Springer Science & Business Media, 2007.

MOUBRAY, J. *Reliability-Centered Maintenance*. 2. ed. New York, NY: Elsevier, 1999.

MUCHIRI, A. K. & SMIT, K. Application of Maintenance Interval De-Escalation in Base Maintenance Planning Optimization, *Enterp Risk Management*, v. 1, 2009.

O'CONNOR, P. D. T.; A. KLEYNER. *Practical Reliability Engineering*. New York. NY: Wiley, 2012.

OZKOL, I., and C. SENTURK. The effects of the use of single task-oriented maintenance concept and more accurate letter check alternatives on the reduction of scheduled maintenance downtime of aircraft. *In: 8th International Conference on Mechanical and Aerospace Engineering (ICMAE)*, p. 67–74, 2017. doi:10.1109/ICMAE.2017.8038619.

SHAH, A. I. J., YUSOFF, N. M., & NOOR, N. M. Optimization of Sukhoi Su-30MKM maintenance planning for maximum operational readiness, *IEEE Region 10 Annual International Conference, Proceedings/TENCON*, p. 2500–2503, 2017,. <https://doi.org/10.1109/TENCON.2017.8228282>

WITTEMAN, M.; DENG, Q.; SANTOS, B. F. A bin packing approach to solve the aircraft maintenance task allocation problem, *European Journal of Operational Research*, v. 294, n. 1, p. 365–376, 2021. ISSN 0377-221.

Modelo para recomendações no tratamento de itens do tipo “rogue”

Alexandre Dias Irigon¹

Fernando Teixeira Mendes Abrahão²

O suporte logístico é geralmente relegado a uma segunda etapa durante o desenvolvimento de projetos ou produtos. No entanto, essa prática pode levar a um produto logisticamente imaturo no momento da entrega ao primeiro operador. Um desses problemas remonta ao gerenciamento de Unidades Rogue, um subconjunto de componentes cujas taxas de falha diferem (para pior) de outros itens idênticos. Este fenômeno leva a uma degradação na relação custo benefício para os sistemas envolvidos.

Este trabalho se propõe a desenvolver um modelo prescritivo, a ser aplicado durante a preparação, desenvolvimento e produção, para identificar, prevenir e tratar problemas relacionados a Unidades Rogue durante a fase do ciclo de vida em serviço. A metodologia proposta é delimitar o caso de estudo por meio de uma revisão completa da literatura, listar os elementos ILS mais relevantes através da opinião de especialistas e de análise de conteúdo, deduzir recomendações e validar as recomendações com Grupo Focal. As contribuições deste trabalho incluem a academia, com um modelo generalizável de geração de recomendações, a indústria, com a própria lista gerada, e o Governo, com orientações seguras sobre como melhorar seus processos de aquisição verificando a aplicação das recomendações geradas.

¹ E-mail: irigon@ita.br

² AeroLogLab-ITA (www.aerologlab.ita.br). E-mail: abrahao@ita.br

Contextualização e definição do problema

Num sistema aeronáutico complexo, durante a fase do ciclo de vida chamada “operação”, os principais fatores de custo são a manutenção e o suprimento. Nesta mesma fase, cerca de 63%-68% dos custos totais do ciclo de vida estão concentrados (ESTADOS UNIDOS, 2014). Por conseguinte, a manutenção e um controle do inventário é sempre uma medida importante para reduzir os custos, assegurar a disponibilidade e evitar o desperdício de recursos financeiros. Em última análise garantir a melhor relação custo benefício possível para aquele sistema.

Na gestão do suprimento, existe um subconjunto de indivíduos que podem apresentar uma confiabilidade ligeiramente inferior ao esperado (chamados Unidades Rogue). Estes indivíduos há muito infestam os estoques de material, causando perdas, retrabalho e diminuindo a disponibilidade e comprometendo a relação custo benefício do produto. Embora problemáticos, são difíceis de identificar e, provavelmente, são uma consequência da falta de maturidade do suporte logístico de sistemas complexos em produtos novos e antigos (Carrol III, 2005, 2008; Mortada *et al.*, 2012).

Definição do problema

Quando problemas semelhantes aos das Unidades Rogue surgem durante a fase do ciclo de vida da operação, uma solução típica é tentar resolvê-lo localmente sem olhar para trás nas fases iniciais do desenvolvimento e encontrar a melhor abordagem sistêmica para o caso. Observando o início do projeto, ou seja, antes da primeira entrega, pode ser possível compreender, agir e evitar que os sistemas continuem a apresentar problemas devido à falta de uma gestão correta do Apoio Logístico Integrado (ILS) ao longo das fases do ciclo de vida. Ademais, há uma falta de

ferramentas para identificar o problema e apoiar aos primeiros operadores. Não obstante, os erros de diagnóstico aumentam ainda mais o problema, e a solução errada é sempre repetida (Söderholm, 2007).

Nota-se também que a literatura atual não é clara quanto à definição do termo Unidade Rogue, nem existe uma metodologia robusta para gerar tal definição, o que nos leva a uma lacuna teórica.

Adicionalmente, os trabalhos pesquisados em todas as bases de dados não demonstram soluções claras para o problema. As abordagens na literatura sobre a Unidade Rogue estão em conflito entre si, devido à ausência de uma definição correta precisa. Temos uma abordagem prática aplicada pela indústria (identificação e eliminação) que não parece ser a mais apropriada. Há também uma falta de aderência às normativas existentes, em que a causa ainda não foi claramente identificada.

As Unidades Rogue podem sobre-dimensionar, exceder o custo e gerar grande complexidade na disponibilidade, manutenção, confiabilidade, e gestão da segurança de voo. Os sistemas suportados pela contaminação de tal anomalia não respondem às práticas habituais de gestão. Além disso, há uma falta de ferramentas para identificar com precisão as peças Rogue, o que pode potencializar a pobreza de apoio para o primeiro operador (Carrol III, 2005), (Mortada *et al.*, 2012). Em resumo, afeta o custo, a prontidão, a segurança e a disponibilidade de um sistema complexo.

O problema atual é a falta de uma abordagem sistêmica e prática das ações diretas durante as fases de conceito, desenvolvimento e produção no ciclo de vida, para assegurar que o novo sistema estará logisticamente maduro no momento da primeira entrega ao operador.

Embasamento teórico e hipótese(s)

A análise feita sobre as Unidades Rogue e seu paralelo com o fenômeno onde um item considerado falhado, não apresenta falha quando testado em bancada (do inglês *No Fault Found* NFF) e posiciona a contribuição deste trabalho frente à lacuna encontrada, após cuidadosa revisão da literatura.

Esse processo retornou vinte e cinco publicações que foram analisadas na íntegra. Além disso, recomendações específicas para identificação, tratamento e prevenção de Unidades Rogue são restritas a poucos trabalhos. Adiciona-se que é ausente uma definição clara

Também foi feito um resumo sobre as definições propostas de Unidades Rogue e as recomendações encontradas nas fases de Conceito, Desenvolvimento, Produção e Em Serviço, nas publicações analisadas.

Ao longo do exaustivo processo de busca pela definição de Unidades Rogue, algumas idiosincrasias podem ser percebidas nas descrições e aplicações apresentadas. Embora não sejam conflitantes, eles falham em delinear a Unidade Rogue adequadamente.

No início das menções pesquisadas, a Unidade Rogue era confundida com os itens de mortalidade infantil, eliminados com o *purge* ou *burn-in* (King, 1977; Mackintosh, 1966; Mead, 1975), embora para Mead (1975) Møltoft (1983) eram itens mais resistentes.

Em seguida, o termo *Rogue* é apresentado para vários tipos de problemas em que o comportamento da falha é anômalo (Afolabi, 1988), mas considerado uma falha oculta ou um efeito do envelhecimento (Shawlee; Humphrey, 2001) ou um item que exhibe ciclo de rejeição ininterrupto (James *et al.*, 2003). Para Ramsey (2005) ainda não está clara uma definição para Unidades Rogue.

Carroll (2005) começa a mudar a definição acrescentando a impossibilidade de evitar a Unidades Rogue (Carroll III, 2008), estabelecendo quatro critérios de identificação e destacando a importância de combatê-la. Mesmo assim, não o diferencia do NFF em todos os seus trabalhos futuros (Leung *et al.*, 2007; Mortada *et al.*, 2012).

Söderholm (2007) é definitivo e conclusivo ao apontar que até o momento não há consenso em torno do NFF, paralelamente, também não há consenso sobre a Unidades Rogue (grifo nosso). Mesmo nas novas aplicações citadas em mais adiante no trabalho de revisão da literatura, a definição muda um pouco para uma forma mais genérica onde Rogue se refere ao componente que possui um histórico de funcionamento que se desvia dos demais componentes típicos (Lake; McCullough; Chapman, 2016), no entanto ainda não se diferencia do NFF.

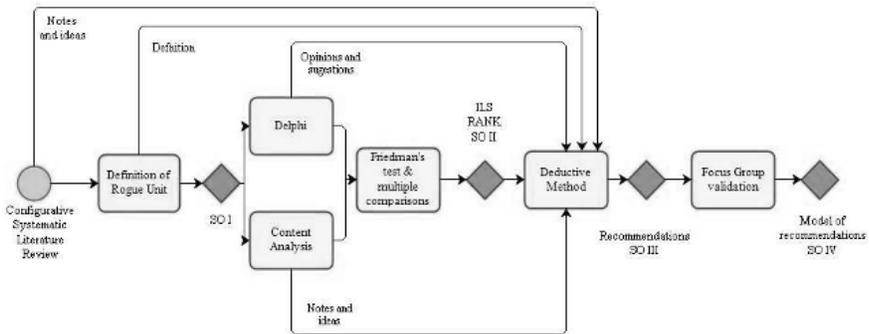
Metodologia (e aplicação da metodologia)

O fluxo metodológico pode ser sintetizado de acordo com os passos descritos a seguir onde o ponto de partida é a Revisão Bibliográfica Sistemática Configurativa (Dresch; Lacerda; Antunes Júnior, 2015), que produziu a definição da Unidade Rogue. Nesta etapa, uma renderização teórica coerente foi capaz de compreender como a literatura tratou o estudo de caso e seu viés. Produziu também as anotações e ideias para alimentar o Método Dedutivo (Dresch; Lacerda; Antunes Júnior, 2015).

Um segundo passo é supor que aplicando Delphi (Brown, 1968), Análise de Conteúdo (Hsieh; Shannon, 2005) e Friedman (*Portal action*, 2020), poderemos identificar quais elementos do ILS (*Aerospace and defence industries association of europe*, 2018) são os mais cruciais para compor o Modelo de Recomendações.

Opiniões, sugestões, notas e ideias alimentam o Método Dedutivo (Dresch; Lacerda; Antunes Júnior, 2015). Com o Método Dedutivo, levanta-se o Modelo de Recomendações, ao final validado por um Grupo Focal Confirmatório (Tremblay; Hevner; Berndt, 2010). A Figura 1 representa a descrição da metodologia apresentada.

Figura 1: Fluxo metodológico



Fonte: Irigon e Abrahão (2024).

Resultados e discussão

Foi feita uma pesquisa minuciosa e extensa nas bases de pesquisa apresentadas para esclarecer até que ponto o problema da Unidades Rogue foi tratado até o presente. No total, 7.656 artigos subiram após a aplicação dos filtros analisados e aplicados (IRIGON, 2020). Após último escrutínio, um total de vinte e cinco artigos (resultados primários) foram selecionados para compor uma base renderizada das informações.

Com essa base inicial, em continuidade ao protocolo de pesquisa, foi feita uma busca de novas publicações nas referências bibliográficas apresentadas nos 25 resultados iniciais. Como esperado, apenas duas novas publicações foram listadas. Finalmente, as citações levantadas a partir das leituras foram verificadas, se disponíveis, e adicionadas à lista de referências.

Uma vez apresentado o protocolo de pesquisa, minunciosamente analisados os artigos remanescentes foi possível o estabelecimento da definição fundamental. O Quadro 1 resume o trabalho de revisão aplicado, com suas respectivas bases de pesquisa.

Quadro 1: Base de dados e resultados

Base de dados	Resultados não filtrados	Pós-filtros	Resultados primários
<i>Aerospace Research Central (ARC)</i>	254	79	0
<i>American Society of Mechanical Engineers (ASME)</i>	489	52	0
<i>Compendex (Engineering Village – Elsevier)</i>	2,837	31	0
<i>Derwent Innovations Index (Web of Science)</i>	973	214	1
<i>EBSCO</i>	6,606	2744	0
<i>Emerald</i>	1,457	83	0
<i>IEEE Xplore (Institute of Electrical and Electronics Engineers)</i>	599	40	0
<i>(ITA) – Integrated library research – EBSCO</i>	355,487	117	3
<i>National Aeronautics and Space Agency (NASA)</i>	846	35	0
<i>ProQuest</i>	35,508	207	6
<i>Scholar Google</i>	77,265	1188	3
<i>Science Direct (Elsevier)</i>	11,558	2507	12

<i>Scientific Electronic Library Online (SciELO)</i>	5	5	0
<i>Scopus (Elsevier)</i>	49,038	256	0
<i>Web of Science</i>	6,681	98	0
Total	549,603	7656	25

Fonte: Irigon e Abrahão (2024).

Assim, verificou-se que os conceitos apresentados não contemplam todas as facetas das Unidades Rogue, a saber:

- a) O item que apresenta taxa de falha diferente do componente padrão;
- b) Possibilidade de uso mesmo que seja conhecido seu modo de falha, cuja correção de tal modo de falha não elimine o caráter mais efêmero do item;
- c) Abordagem que considera a melhora e piora da condição anômala, independentemente do envelhecimento do item;
- d) Diferenciação do fenômeno NFF;
- e) A capacidade mutativa de uma Unidade Rogue; e
- f) O valor agregado do item (componente complexo).

Portanto, para tratar de aspectos tão peculiares, propomos a seguinte definição: Unidade Rogue é um item complexo de relevante valor agregado, pertencente a um sistema complexo, cuja taxa de falha difere de outros itens similares, que não podem ser evitados e possuem um modo de falha conhecido ou desconhecido.

Método Delphi

O método Delphi foi escolhido para levantar, entre um painel de especialistas, quais elementos do ILS são mais importantes para a identificação, prevenção e solução de problemas de suporte decorrentes da existência de Unidades Rogue entre sistemas complexos. Em duas etapas de avaliação os painelistas foram instigados a opinar e ranquear quais elementos do Suporte Logístico Integrado (*Integrated Logistic Support – ILS*) se mostraram mais relevantes para o caso de estudo.

Vale ressaltar que o método Delphi tem uma aplicação precisa para a prospecção de ideias e estratégias para a proposição de políticas organizacionais e, juntamente com os demais métodos de prospecção de opinião (painel de especialistas, construção de cenários, brainstorming, análise SWOT) são dedicados ao estudo do futuro e do desenvolvimento tecnológico. O método Delphi, no entanto, é o mais adequado para esta pesquisa porque é ideal para antecipar possibilidades futuras, com base em uma iteração não estruturada de problemas complexos, com falta de dados históricos ou conhecimento difuso, ou para prospecção de conhecimento (Dias, 2007; Marques e Freitas, 2018).

O Quadro 2 resume os resultados alcançados após a conclusão dos trabalhos com os painelistas.

Quadro 2: Ordem de importância dos elementos após o DELPHI

Elementos do ILS	Classificação
<i>Design Influence (DI)</i>	1
<i>Maintenance (MTNC)</i>	2
<i>Manpower and Personnel (MnP)</i>	3
<i>Sustaining Engineering (SENG)</i>	4
<i>Support Equipment (SEQ)</i>	5
<i>Training and Training Support (TnTS)</i>	6
<i>Technical Data (TECHD)</i>	7
<i>Computer Resources (CR)</i>	8
<i>Supply Support (SS)</i>	9
<i>Packaging, Handling, Storage and Transportation (PHSnT)</i>	10
<i>Facilities and Infrastructure (Fnl)</i>	11
<i>Product Support Management (PSM)</i>	12

Fonte: Irigon e Abrahão (2024).

Análise de conteúdo

O objetivo da utilização deste método é o mesmo do Delphi identificando, na literatura pesquisada, quais elementos do ILS são mais importantes para a identificação, prevenção e solução de problemas de suporte, relacionados à existência de Unidades Rogue em sistemas complexos. No entanto, a utilização do método de Análise de Conteúdo complementa o método Delphi. No primeiro, temos o viés acadêmico sobre o tema, enquanto o segundo abrange a discriminação mais pragmática, operacional.

O Quadro 3 resume os resultados encontrados após a aplicação da Análise de conteúdo.

Quadro 3: Ordem de importância dos elementos após Análise de Conteúdo

Elementos do ILS	Classificação
<i>Maintenance (MTNC)</i>	1
<i>Design Influence (DI)</i>	2
<i>Manpower and Personnel (MnP)</i>	3
<i>Training and Training Support (TnTS)</i>	4
<i>Product Support Management (PSM)</i>	5
<i>Technical Data (TECHD)</i>	6
<i>Facilities and Infrastructure (F&I)</i>	7
<i>Computer Resources (CR)</i>	8
<i>Support Equipment (SEQ)</i>	9
<i>Packaging, Handling, Storage and Transportation (PHSnT)</i>	10
<i>Supply Support (SS)</i>	11
<i>Sustaining Engineering (SENG)</i>	12

Fonte: Irigon e Abrahão (2024).

Testes não-paramétricos

Conforme descrito na metodologia, temos para os resultados do método Delphi e Análise de Conteúdo, diversas amostras, ranqueadas com categorias e tratamentos. Para avaliar as classificações obtidas quanto ao seu grau de diferenciação, foi aplicado o Teste de Friedman.

O resultado encontrado apontou que os diversos elementos do ILS não possuíam significância estatística para serem diferenciados em categorias exclusivas, logo as recomendações adquiridas serão analisadas empregando todos os elementos do ILS.

Dedução das recomendações

O processo de dedução das recomendações foi o trabalho mais demorado. As recomendações foram o primeiro resultado esperado, e isso vem sendo buscado desde a primeira leitura. Com este objetivo, cada trecho analisado, que potencialmente poderia ser convertido em recomendação, foi catalogado, analisado e confrontado minuciosamente com as demais publicações lidas, num movimento de conferência e revisão até que todas as possíveis relações fossem analisadas. Posteriormente, foi feita uma segunda análise em que cada recomendação potencial foi comparada com outras semelhantes, redundâncias foram excluídas, o texto foi delimitado e a correlação com os Elementos do ILS, quando não originando das próprias definições, foi feita. Após as rodadas Delphi, as recomendações sugeridas pelos membros do painel também foram integradas ao ciclo de análise de adaptação.

Em seguida, as quarenta e quatro recomendações geradas foram agrupadas conforme sua aplicação no ciclo de vida e justificadas com base na literatura, para as fases de Preparação, Desenvolvimento e Produção.

O Quadro 4 resume os títulos das recomendações para as diversas fases do ciclo de vida elencados. As recomendações não serão traduzidas para que não haja prejuízo de significado quanto aos resultados alcançados.

Quadro 4: Lista de recomendações

Número	Recomendação	Fase do ciclo de vida a que se aplica
1	<i>Include the identification, prevention and treatment of the Rogue Unit as a supportability requirement.</i>	Fase de preparação
2	<i>Develop a Computerized Maintenance Management System (CMMS) with the logistic requirements (assessment metrics) for identification, prevention and treatment. Including auto analysis of affordability for repair, discard, refurbish or manage the item (this info may come from Business Case Analysis).</i>	Fase de preparação
3	<i>Commit the Original Equipment Manufacturers (OEM) of Line Replacement Units (LRU) the use Computer Resources to trace/track the log life of an item. Also, prevent counterfeit parts.</i>	Fase de preparação
4	<i>Design bench tests with higher test capabilities and ensures test coverage to diminish ambiguity.</i>	Fase de preparação
5	<i>Design the product in a way that ambiguous failures could be straightforwardly identified in the troubleshooting process and discard the possibility of a Rogue Unit.</i>	Fase de preparação
6	<i>Establish Rogue Units assessment metrics for contracts in Business Case Analysis (BCA).</i>	Fase de preparação
7	<i>Establish, based on logistic requirements, which data shall be collected to enable the analysis of Rogue Units (Intellectual property as well). Use of Engineering Changes Requests (ECR) and Contract Data Requirement's List (CDRL).</i>	Fase de preparação
8	<i>Implementation of an automatic reengineering analysis process after discarded Rogue Unit hypotheses to compensate the no fault found (NFF) phenomena.</i>	Fase de preparação
9	<i>Integrate Logistic Support Analysis (LSA) team to Rogue Unit identification, prevention and treatment requirements.</i>	Fase de preparação
10	<i>Submit only those items that have been selected by the Logistic Support Analysis (LSA) to the Rogue Unit candidate analysis.</i>	Fase de preparação

11	<i>Use the Modular Open Systems Approach (MOSA) concept during design to facilitate other assessment metrics usage or software, to prevent, identify or deal with Rogue Units.</i>	Fase de preparação
12	<i>Include a clear statement in the Request For Proposal (vendors' survey) about Rogue Unit aspects: warranty, data management, reliability aspects and limits.</i>	Fase de preparação
13	<i>If, due to a high mission Desempenho requirement, an item was developed with lower supportability requirement propose an enhanced Logistic Support Analysis for that item.</i>	Fase de preparação
14	<i>Include in Life Cycle Sustainment Plan (LCSP) the requirements to treat, identify and prevent Rogue Unit or alternatives for a solution.</i>	Fase de preparação
15	<i>Special rules for LRU's maintenance manuals change. Usually, the test sequence differs when the parts are modified.</i>	Fase de preparação
16	<i>Include in the independent logistic assessment (ILA, before milestone B, end of preparation/ TMRR phase) the verification of the management requirements of the Rogue Units.</i>	Fase de preparação
17	<i>Include special rules for Rogue Units when establishing Desempenho and product design data. Special rules establishing penalties or rewards regulations for warranty clauses regarding the management of Rogue Units. Potential systematic failures would be analysed after the return in service of a new part. The OEM and the user must agree to provide enough data to solve the problem.</i>	Fase de preparação
18	<i>Develop maintenance concepts where Rogue Units are considered.</i>	Fase de preparação
19	<i>Take considerations regarding obsolescence and ageing when developing maintenance concept for Rogue Units.</i>	Fase de preparação
20	<i>Design the product considering Rogue Units experiences from legacy projects or suppliers.</i>	Fase de preparação
21	<i>Pay attention to the accounting control on mitigation measures for Rogue Units within BCA, estimating possible savings with LCC.</i>	Fase de preparação

22	<i>Integrate the logistic chain in-depth, with vendors, to establish the correct level of testability, providing the proper level of adequacy to the Rogue Unit policy.</i>	Fase de
23	<i>Deeply analyse events with prototypes that misled to the wrong usage of the troubleshooting (human factor analysis). Develop troubleshooting procedures.</i>	Fase de
24	<i>Establish, develop or improve the feedback process to support the Rogue Unit treatment or troubleshooting.</i>	Fase de desenvolvimento
25	<i>Develop and test a communication system focused on the Rogue Unit troubleshooting for entry to service. Establish priority communications channels with first operators (or first upgrade operators) to receive rapidly feedback on a Rogue situation and share information.</i>	Fase de
26	<i>Utilization of tags to correctly identify the Rogue Units on the inventory. It might be used smart tags as well (RFID, QR code, bar code...) or a special transponder.</i>	Fase de
27	<i>Establish a proper model to follow up the evolution, regression or stabilization of reliability of the Rogue Unit. Diagnostics, prognostics and health management (D&PHM). Special transponder.</i>	Fase de
28	<i>Implementation of a trigger to change the current inventory control model, once the Rogue Unit was identified. Conventional inventory control models can cause a significant increase in units since they are contaminated with Rogue Units. (Differentiate from NFF)</i>	Fase de
29	<i>Procure affordable (rigs models) test bench with higher test capabilities or agree on proper acceptance tests levels. Upgrade existing test benches when possible.</i>	Fase de
30	<i>Analyse the possibility of using Rogue Unit as a safety level for inventory control.</i>	Fase de

31	<i>Develop the possibility of optimizing allocation the Rogue Unit thru the echelons of the supply structure.</i>	Fase de
32	<i>Adoption of a design and support checklist to the Critical Design Review (CDR) meeting, regarding Rogue Units.</i>	Fase de
33	<i>Identify in TNA the skills necessary to deal with Rogue Units considering the new product not only for maintainers but for engineers as well.</i>	Fase de
34	<i>Adopt in-house experience with a prototype to create additional test procedures for Rogue Units.</i>	Fase de
35	<i>Test the PHSnT options with the prototypes to study the possible failure modes induced by their misuse.</i>	Fase de
36	<i>Test the support equipment (designed or used one) to identify possible induced failure modes by their misuse</i>	Fase de
37	<i>Transcribe to the maintenance manuals and TNA all experiences obtained with development regarding Rogue Unit identification, prevention and management.</i>	Fase de
38	<i>Develop simulations on Rogue Units cases to evaluate CMMS and design solutions</i>	Fase de
39	<i>Analyse/Test F&I regarding storage procedures to identify failure modes generated by misuse.</i>	Fase de
40	<i>Initial training program to correctly identify the Rogue Units which comprises since from the operator training. Requirements from training carry out from LSA.</i>	Fase de produção
41	<i>Check the communication channels opened during development regarding Rogue Units</i>	Fase de produção
42	<i>Establish new acceptance tests on new deliveries. Batch tests (may increase cost) and monitor the supply chain to verify the effectiveness of the measures adopted in the preparation and development.</i>	Fase de produção
43	<i>Verify the needs for Engineering Change Proposal (ECP) related to Rogue Units to propose a requirement list to contractors to decide whether to repair, remanufacture or manage the Rogue Unit.</i>	Fase de produção

44	<i>If necessary, implement the use of more accurate test benches (surveyed in other projects during the production phase) for the identification of Rogue Units.</i>	Fase de produção
----	--	------------------

Fonte: Irigon e Abrahão (2024).

Quanto à contribuição por elemento do ILS o Quadro 5 resume os resultados obtidos.

Quadro 5: Contribuições por elementos do ILS

Elementos do ILS	Contribuições para o modelo
<i>Product Support Management (PSM)</i>	23
<i>Design Influence (DI)</i>	21
<i>Maintenance (MTNC)</i>	13
<i>Technical Data (TECHD)</i>	11
<i>Sustaining Engineering (SENG)</i>	11
<i>Supply Support (SS)</i>	6
<i>Training and Training Support (TnTS)</i>	5
<i>Computer Resources (CR)</i>	5
<i>Support Equipment (SEQ)</i>	5
<i>Packaging, Handling, Storage and Transportation (PHSnT)</i>	4
<i>Manpower and Personnel (MnP)</i>	2
<i>Facilities and Infrastructure (Fnl)</i>	1

Fonte: Irigon e Abrahão (2024).

Grupo Focal Confirmatório

O Grupo Focal Confirmatório atingiu seu objetivo de analisar e argumentar com cada recomendação gerada. A grande maioria das recomendações foi consensualmente considerada relevante, sem discussão, no primeiro turno de votação. Esse consenso decorre do caráter autoexplicativo e direto da maioria dos textos apresentados para análise.

Conclusão

Inicialmente, o problema de pesquisa se estabeleceu em uma lacuna acadêmica, institucional e operacional. Ao levantar a questão das Unidades Rogue, foi possível perceber que pouco tinha sido reportado e que as medidas de mitigação de custos operacionais eram escassas e não integradas. Para tal, foi proposto um modelo de recomendações para apresentar uma abordagem sistêmica e prática ao estudo de caso que integrou a visão do designer, de forma abrangente, aos Elementos de Apoio Logístico Integrado.

O trabalho iniciou-se com uma Revisão Sistemática da Literatura, seguida da ordenação de importância dos Elementos da ILS através dos métodos Delphi e Análise de Conteúdo, com estes materiais foram deduzidas as recomendações, que posteriormente foram validadas por especialistas. Começando com a Revisão Sistemática da Literatura, até o limite desta pesquisa, toda a literatura disponível sobre Unidades Rogue foi obtida. Marcada pela indústria aeroespacial, a revisão mostrou que não havia consenso sobre a definição de Unidades Rogue e, ainda assim, havia grande confusão com o Fenômeno NFF. Ao final, uma nova definição foi apresentada.

A segunda conclusão a que se chegou foi que os Elementos ILS possuem forte integração em relação ao estudo de caso e foram, em parte, pouco diferenciados. Partindo dos resultados

anteriores foi derivado um modelo com 44 recomendações para as fases de Preparação, Desenvolvimento e Produção.

Também foi possível perceber que os painelistas convidados estão cercados por um paradigma no qual os projetos, por eles concebidos, não estão, teoricamente, sujeitos a falhas desconhecidas. Este paradigma impediu, por vários momentos, que os especialistas fossem capazes de gerar soluções para mitigar os problemas apresentados pelas Unidades Rogue.

Por fim, o modelo de recomendação mostrou-se robusto quando foi validado, praticamente, como totalmente relevante, à exceção de três das quarenta e quatro recomendações. Apesar de laborioso, o modelo metodológico proposto no trabalho revelou-se eficiente para gerar o modelo de recomendações, validado, claramente rastreável, robusto e com rigor científico que contribuiu para cobrir a lacuna acadêmica, institucional e operacional, para um problema complexo.

Ele fornece contribuições para a indústria, pois a aplicação das recomendações gera um produto mais maduro em termos de suportabilidade. Ele fornece contribuições para o cliente, que usando o modelo, melhora sua capacidade de discernir o nível de suporte esperado dos fornecedores e fabricantes de equipamentos originais.

Oferece contribuições para que a cadeia logística possa entender com clareza as necessidades de melhoria dos processos e o grau de qualidade esperado. Ele fornece contribuições para a Academia ao estabelecer mais uma metodologia de análise robusta, generalizável e capaz de retroalimentar a base de conhecimento.

Restrições do trabalho

A primeira restrição imposta ao trabalho foi a quantidade de banco de dados procurado. Para elucidar as principais bases de pesquisa a serem incluídas, foi realizada uma entrevista preliminar

com profissionais da biblioteconomia que indicaram uma vasta e abrangente (quinze) base de dados, conhecida mundialmente, bem como a base do repositório de patentes.

A segunda restrição diz respeito à experiência do participante. Seguindo o modelo proposto por Dias (2007), eles foram indicados por seus pares, considerando os primeiros selecionados. Para os primeiros buscou-se uma indicação por meio do conhecimento de professores do ITA que apontaram os contatos iniciais até a formação da rede de voluntários com experiência no assunto.

Além disso, o foco da pesquisa é aplicado ao setor aeronáutico, cuja literatura pesquisada apresentou um número mais significativo de resultados, além de maior relevância para o programa de pesquisa estudado.

Trabalhos futuros

Esta pesquisa não pretendeu delimitar o processo de implementação do modelo, pelo que se apresentam algumas recomendações para trabalhos futuros. Primeiramente, sugere-se estudar os motivos pelos quais as normas disponíveis não aderem ao cotidiano da indústria. Observou-se que tais recomendações não têm alcance na comunidade operacional (engenheiros de conceito). Essa afirmação, entretanto, não se confirma para normas que impliquem segurança.

Em segundo lugar, podem ser sugeridos estudos para a correta avaliação dos custos da não-gestão das Unidades Rogue durante a operação, bem como um modelo para implementação das recomendações geradas neste trabalho.

Por fim, sugere-se uma análise de otimização da Unidades Rogue nas faixas de abastecimento para minimizar custos e maximizar as taxas de disponibilidade.

Referências bibliográficas

AEROSPACE AND DEFENSE INDUSTRIES ASSOCIATION OF EUROPE AEROSPACE INDUSTRIES ASSOCIATION, A. *SX000i*: International guide for the use of the S-Series Integrated Logistic Support (ILS) specifications. 1.2 ed. Brussels: ASD; AIA, 2018. E-book. Disponível em: <https://www.sx000i.org/>. Acesso em: 16 out. 2020.

AFOLABI, D. A note on the rogue failure of turbine blades, *Journal of Sound and Vibration*, v. 122, n. 3, p. 535–545, 1988.

BROWN, Bernice. B. Delphi process: a methodology used for the elicitation of opinions of experts, *ASTME Vectors*, n. fevereiro, p. 1–15, 1968. Disponível em <https://www.rand.org/pubs/papers/P3925.html>. Acesso em: 2 abr. 2020.

CARROLL III, Thomas H. Rogue units: focus on cost containment, *Aviation Pros*, March 1st, 2005. Disponível em: <https://www.aviationpros.com/home/article/10385868/rogue-units-focus-on-cost-containment>. Último acesso em: 2 abr. 2020.

CARROLL III, Thomas. H. The statistical outliers are in control of asset management. In: MAINTENANCE AND RELIABILITY CONFERENCE, 2008, Knoxville, Proceedings [...]. [S. l.: s. n.], p. 1-14, 2008.

DIAS, Rita de Cássia Barros. *Método Delphi*: uma descrição de seus principais conceitos e características. 2007. 80 f. Monografia (Especialização em Pesquisa de Mercado em Comunicação) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

DRESCH, Aline; LACERDA, Daniel Pacheco; ANTUNES JÚNIOR, José Antonio Valle. *Design science research*: método de pesquisa para avanço da ciência e tecnologia. Porto Alegre: Bookman, 2015. E-book.

HSIEH, Hsiu-Fang.; SHANNON, Sarah. E. Three approaches to qualitative content analysis, *Qualitative health research*, v. 15, n. 9, p. 1277–88, 2005.

IRIGON, Alexandre Dias. *Model design recommendations for treating Rogue Units*. 2020. 174 f. Dissertation (master's in science in the Program Space Sciences and Technologies) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2020.

JAMES, I. *et al.* Investigating no fault found in the aerospace industry. In: *ANNUAL RELIABILITY AND MAINTAINABILITY SYMPOSIUM*, Tampa. Proceedings [...]. Piscataway: IEEE, p. 441-446, 2003.. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1182029/>. Acesso em: 18 maio 2020.

KING, G. R. Quality control and screening in the production of plastic encapsulated semiconductor devices (PEDs), *Microelectronics Reliability*, v. 16, n. 3, p. 245–249, 1977.

LAKE, Peter. J.; MCCULLOUGH, Jay. K.; CHAPMAN, S. D. *Fleet Desempenho Optimization tool enhancement*. US 9,327,846 B2 Granted on May, 3. ed., 2016. Disponível em: <http://patentstore.derwent.com/portal/servlet/>

LEUNG, Tim *et al.* The Carroll–Hung method for component reliability mapping in aircraft maintenance, *Quality and Reliability Engineering International*, v. 23, n. 1, p. 137–154, 2007.

MACKINTOSH, I. M. The reliability of integrated circuits, *Microelectronics Reliability*, v. 5, n. 1, p. 27–37, 1966. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0026-2714\(66\)90007-2](https://doi.org/10.1016/0026-2714(66)90007-2). Último acesso em: 10 mar. 2020.

MARQUES, Joana Brás Varanda; FREITAS, Denise de. Método Delphi: caracterização e potencialidades na pesquisa em Educação, *Pro-Posições*, v. 29, n. 2, p. 389–415, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1980-6248-2015-0140>. Acesso em: 15 jan. 2020.

MEAD, P. H. Reliability growth of electronic equipment, *Microelectronics Reliability*, v. 14, n. 5–6, p. 439–443, 1975. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0026-2714\(75\)90154-7](https://doi.org/10.1016/0026-2714(75)90154-7). Acesso em: 10 mar. 2020.

MORTADA, Mohamad-Ali *et al.* Rogue components: their effect and control using logical analysis of data, *Journal of Intelligent Manufacturing*, v. 23, n. 2, p. 289–302, 1 2012.

PORTAL ACTION. *5-teste de Friedman*. São Carlos: Estatcamp Consultoria em Estatística e Qualidade, 2020. Disponível em: <http://www.portalaction.com.br/tecnicas-nao-parametricas/teste-de-friedman>. Último acesso em: 20 ago. 2020.

RAMSEY, James. W. Avoiding NFF, *Avionics Magazine*, Rockville, v. 29, n. Aug, p. 1–6.

SHAWLEE, W.; HUMPHREY, D. Aging avionics—what causes it and how to respond, *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, v. 24, n. 4, p. 739–740, 2001.

SÖDERHOLM, Peter. A system view of the No Fault Found (NFF) phenomenon, *Reliability Engineering & System Safety*, v. 92, n. 1, p. 1–14, 1 Jan. 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.RESS.2005.11.004>. Acesso em: 23 out. 2019.

TREMBLAY, M. C.; HEVNER, A. R.; BERNDT, D. J. Focus Groups for Artifact Refinement and Evaluation in Design Research, *Communications of the Association for Information Systems*, v. 26, n. 1, p. 559–618, Jun. 2010.

UNITED STATES. Department of Defense. *Operating and support cost-estimating guide office*. [Washington, DC]: Cost Assessment and Program Evaluation Secretary of Defense. Disponível em: https://www.cape.osd.mil/files/OS_Guide_v9_March_2014.pdf. Acesso em: 15 jun. 2020.

Modelagem da suportabilidade e simulação de cenários operacionais como ferramentas para o desenvolvimento de sistemas complexos

Daniel Buch¹

Fernando Teixeira Mendes Abrahão²

Contextualização e definição do problema

Sistema complexo é aquele formado por elementos variados integrados e que envolvem diversas disciplinas da engenharia para seu desenvolvimento, fabricação, operação e suporte, resultando em sistemas de alto valor agregado, alta tecnologia e alto custo. Outra característica dos sistemas complexos é a longa expectativa de vida em serviço, normalmente operando por mais de 20 anos, com casos que excedem os 40 anos de serviço. Aeronaves e carros de combate são exemplos de sistemas complexos.

A literatura apresenta diversos modelos para o ciclo de vida de sistemas complexos. O Quadro 1 apresenta quatro modelos de diferentes referências que foram sobrepostos, indicando uma correspondência aproximada entre as fases do ciclo de vida destes modelos.

Quadro 1: Modelos de ciclo de vida para sistemas complexos

REFERÊNCIA	FASES DO CICLO DE VIDA							
(ASD/AIA, 2021b)	Fase de preparação		Fase de desenvolvimento		Fase de produção		Fase de serviço	Fase de descarte
(BLANCHARD, 2014)	Fase de projeto conceitual	Fase de projeto preliminar do sistema	Fase de desenvolvimento e projeto detalhado		Fase de produção/construção		Fase de utilização e suporte	Fase de retirada de serviço e descarte
(NASA, 2016)	Pré-fase A	Fase A	Fase B	Fase C	Fase D	Fase E		Fase F
(BRASIL, 2007)	Concepção	Viabilidade	Definição	Desenvolvimento/Aquisição	Produção		Implantação	Desativação
							Utilização	
							Revitalização/Modernização/Melhoria	

Fonte: Buch e Abrahão (2024).

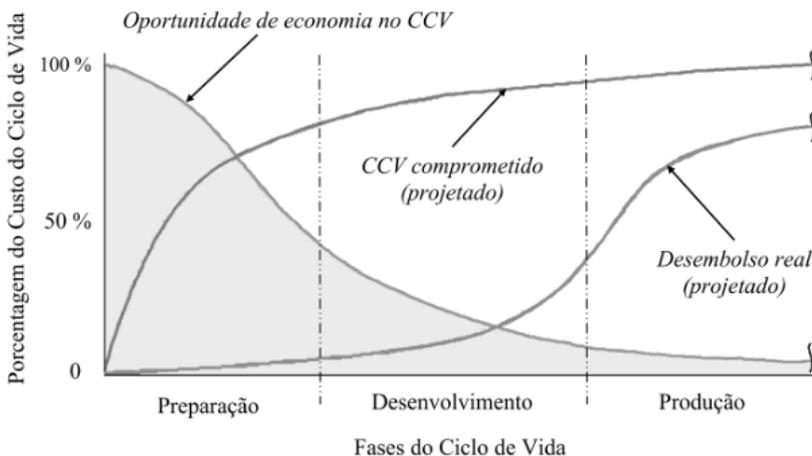
¹ AeroLogLab-ITA (www.aerologlab.ita.br). E-mail: daniel.buch.ita@gmail.com

² E-mail: abrahao@ita.br

Dentro do ciclo de vida de um produto, a fase de serviço, também conhecida como fase de operação e suporte, é considerada a mais importante, visto ser a razão da existência do produto. Quando tratamos de sistemas complexos, em geral, esta é a fase que concentra a maior parcela dos custos do ciclo de vida, sendo fortemente impactada pelos custos de suporte, conhecidos como custos de suporte em vida, ou simplesmente pela sigla LSC, do termo em inglês *Life Support Costs* (Blanchard, 2014).

É consenso entre os principais autores das áreas de Engenharia de Sistemas e de Engenharia Logística que as fases iniciais do desenvolvimento de um produto, onde inúmeras decisões são tomadas, consiste no momento ideal para concentrar esforços em análises e estudos de *trade-off* que apoiem decisões de projeto, visando a economia no custo do ciclo de vida. A abordagem de custo do ciclo de vida no desenvolvimento de sistemas complexo é ilustrada na Figura 1.

Figura 1: Comportamento do custo do ciclo de vida



Fonte: adaptado de Blanchard (2014).

As decisões tomadas nas fases iniciais do desenvolvimento, além de impactarem fortemente o custo do ciclo de vida, afetam a prontidão do sistema. A suportabilidade, que pode ser definida como o grau em que o sistema de suporte atende aos requisitos operacionais do produto, está relacionada tanto ao custo do ciclo de vida quanto à prontidão do sistema. A suportabilidade tem como principais métricas a confiabilidade, a disponibilidade, a manutenibilidade e a segurança, conhecidos como fatores RAMS (do inglês *Reliability, Availability, Maintainability and Safety*).

Apesar de haver vasta literatura recomendando a integração do sistema de suporte ao ciclo de vida do produto, a prática mostra que, com raras exceções, a suportabilidade de sistemas complexos é considerada tardiamente pela indústria, operadores e organizações de manutenção. A própria academia tem ignorado o tema ao deixar de incluí-lo na grade curricular da maioria dos cursos de engenharia (Abrahão *et al.*, 2019).

Um exemplo que retrata a realidade acima mencionada é o da aeronave *Convair B-58 Hustler*, que entrou em serviço em 1961, sendo operado somente até 1970. O B-58 exigia para sua operação e suporte um alto nível de habilidade e treinamento, além de equipamentos altamente especializados para sua manutenção, resultando num enorme custo por hora de voo, o que motivou o precoce início de sua retirada de serviço em 1965. O B-58 demonstrou a necessidade da consideração dos aspectos logísticos como a confiabilidade, a manutenibilidade e o gerenciamento do LCC (*Life Cycle Costs*) no desenvolvimento dos projetos demandados pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos da América (Russel, 2007).

Dado o contexto acima, o problema que este trabalho explora são lacunas existentes no desenvolvimento de sistemas complexos, responsáveis por uma baixa Desempenho das métricas de

suportabilidade e pela elevação dos custos de operação e suporte a patamares que tornam a operação do sistema excessivamente onerosa ou inviável.

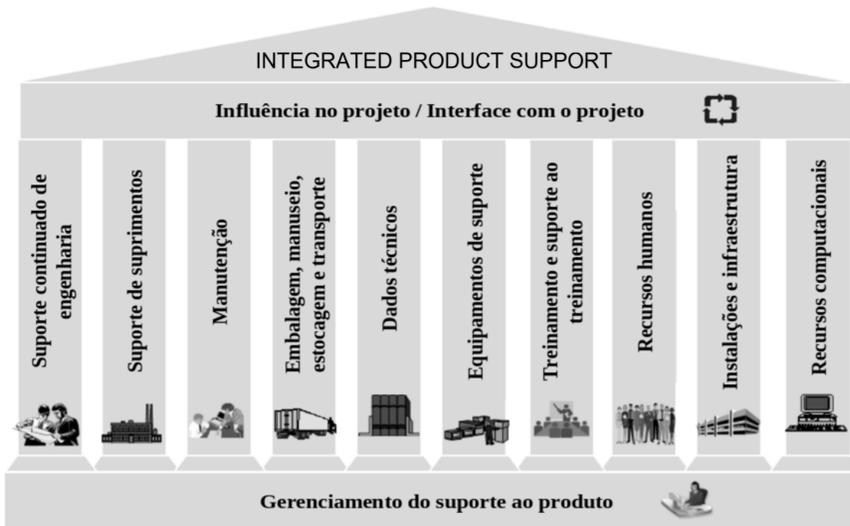
Embasamento teórico e hipótese(s)

Referências como ASD/AIA (2021), DAU (2021) e Blanchard (2014) abordam o suporte integrado ao produto, conhecido pela sigla IPS (do inglês *Integrated Product Support*), que é um processo para que requisitos de suportabilidade sejam integrados ao processo de Engenharia de Sistemas, que por sua vez, de acordo com Blanchard e Blyler (2016), é a aplicação de esforços científicos e de engenharia para:

- a) Transformar uma necessidade operacional numa descrição da Desempenho dos parâmetros do sistema e sua configuração, por meio do uso de um processo iterativo de definição, sínteses, análises, projeto, testes, avaliações e validação.
- b) Integrar parâmetros técnicos e garantir a compatibilidade de todas as interfaces físicas e funcionais.
- c) Integrar confiabilidade, manutenibilidade, segurança e outros fatores em um esforço de engenharia que atenda custos, prazos e metas de Desempenho técnica.

O IPS define uma estrutura organizada na qual ocorre o planejamento, o desenvolvimento, a implantação, o gerenciamento e a execução das atividades de suporte (ASD/AIA, 2021). Para tanto, o IPS contempla 12 elementos que estão ilustrados na Figura 2. O processo estabelece uma série de atividades para cada um dos elementos, as quais ocorrem ao longo do ciclo de vida, com um alto nível de integração entre elas.

Figura 2: Elementos do IPS



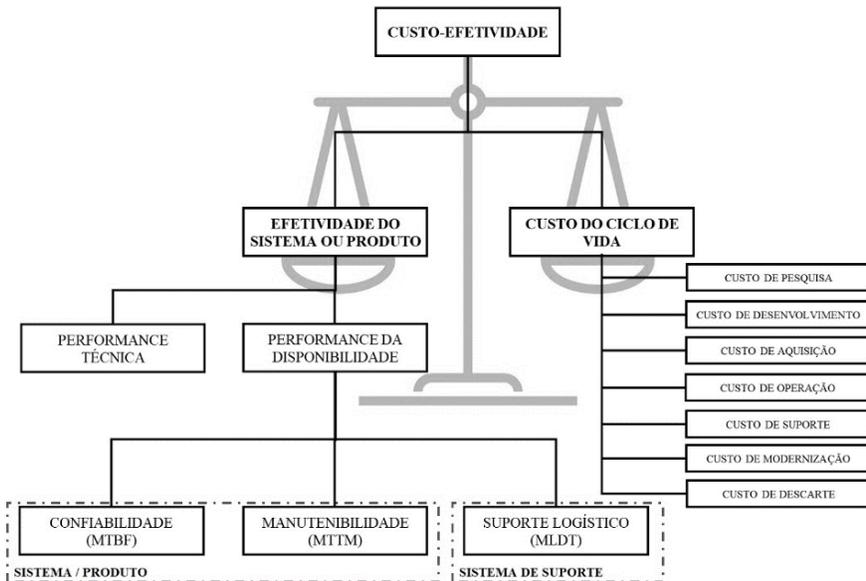
Fonte: adaptado de DAU (2011).

A característica que deve ser perseguida para o desenvolvimento de sistemas complexos é a custo-efetividade, que equivalente ao melhor ponto de equilíbrio entre a efetividade do sistema e o custo do seu ciclo de vida, conforme ilustra a Figura 3, que propõe que a efetividade do sistema não depende apenas de sua Desempenho técnica, mas também da Desempenho da disponibilidade, que reflete sua prontidão operacional.

A Figura 3 deixa claro que além da confiabilidade e da manutenibilidade, que são características inerentes do produto (Blanchard, 2014), o sistema de suporte também afeta a custo-efetividade do produto.

A confiabilidade é a probabilidade do sistema cumprir suas funções satisfatoriamente, num dado intervalo de tempo, quando operado de acordo com condições especificadas, sendo uma característica inerente do item ou sistema (Blanchard, 2014).

Figura 3: Modelo de custo-efetividade



Fonte: adaptado de ASD/AIA (2021).

Segundo ASD/AIA (2021) existem ao menos oito métricas associadas à confiabilidade. O tempo médio entre falhas, conhecido como MTBF (do inglês *Mean Time Between Failure*), é uma das métricas mais representativas da confiabilidade de um componente ou sistema, podendo ser expressa pela Equação 1.

$$MTBF = \frac{\text{Tempo total de operação}}{\text{Total de falhas durante o tempo total de operação}} \quad (1)$$

A manutenibilidade é a probabilidade da ação de manutenção de um item, sob dadas condições de uso, ser efetuada dentro de um intervalo de tempo determinado, quando a manutenção é feita sob determinadas condições e com o emprego de procedimentos e recursos prescritos (ABNT, 1994).

O conceito de manutenibilidade está associado à facilidade e aos tempos de realização de tarefas de manutenção. A Figura 4 apresenta um modelo com os tempos associados à manutenibilidade, com destaque para importantes parâmetros e métricas que compõem a Equação 2, que é a formulação matemática de uma importante métrica de manutenibilidade.

$$MDT = \underline{M} + ADT + LDT = \underline{M} + WT \quad (2)$$

MDT (do inglês *Maintenance Downtime*) é o tempo de inatividade por manutenção: corresponde ao lapso de tempo decorrido desde que o sistema passa a ficar inativo ou indisponível para a realização de manutenção, seja corretiva ou preventiva, até seu retorno ao estado operacional. O *MDT* inclui o \underline{M} , o *ADT* e o *LDT* (Blanchard, 2014).

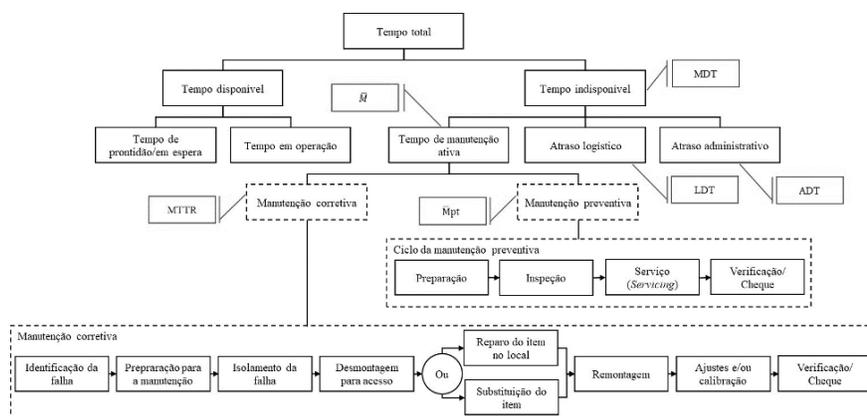
\underline{M} é o tempo médio de manutenção ativa: corresponde ao lapso de tempo médio requerido para a execução das atividades e processos de manutenção, incluindo manutenções corretivas e preventivas. O \underline{M} não inclui o *ADT* nem o *LDT* (Blanchard, 2014).

ADT (do inglês *Administrative Delay Time*) é o tempo de atraso administrativo: soma dos atrasos não diretamente envolvidos com tarefas ou processos de manutenção. Não inclui o tempo ativo de manutenção (ASD/AIA, 2021).

LDT (do inglês *Logistics Delay Time*) é o tempo de atraso logístico: soma dos atrasos resultantes de espera por peças, equipamentos, transporte entre outros atrasos logísticos. O *LDT* não inclui o tempo ativo de manutenção. Constitui um dos atrasos mais relevantes para o desempenho do sistema de suporte (Blanchard, 2014).

WT (do inglês *Waiting Time*) é a soma do *ADT* e do *LDT* (Blanchard, 2014).

Figura 4: Modelo de tempos associados à manutenibilidade



Fonte: adaptado de Blanchard (2014).

Além do *MDT*, outras métricas relevantes de manutenibilidade são: o tempo médio entre manutenções (*MTBM – Mean Time Between Maintenance*), o tempo médio para o reparo (*MTTR – Mean Time To Repair*) e o tempo médio de manutenção preventiva (*Mpt – Mean Preventive Maintenance Time*).

Como visto, o sistema de suporte é responsável por diversos atrasos mapeados na Figura 4. Um dos motivos dos atrasos é a falta de itens em estoque para atender as tarefas de manutenção.

Para o caso de itens de consumo, que não estão sujeitos a um ciclo de reparo, existem modelos consolidados e difundidos na literatura. O modelo determinístico mais comum para a gestão de estoques de itens de consumo é conhecido como dente de serra, que é aplicado com algumas adaptações para absorver os efeitos de variação de demanda e de prazos de ressurgimento.

A gestão de estoque de itens reparáveis envolve muitos parâmetros como tempo de reparo, tempos de transporte, bem como fenômenos como formação de filas devido à limites na capacidade de reparo da estrutura de suporte. Além dos tempos, a

gestão de estoque preocupa-se com todos os custos relacionados ao reparo, transporte e estocagem.

A teoria de estoque de reparáveis envolve uma modelagem matemática que tem como pedra fundamental o Teorema de Palm, que afirma que se a demanda por itens obedece a um processo de Poisson com média anual m , e o tempo de reparo para cada item é independente e identicamente distribuído de acordo com qualquer função com média T , então a distribuição de probabilidade de estado estacionário para o número de unidades em reparo tem uma distribuição de Poisson com média $m.T$ (Sherbrooke, 2004).

Dado que o não atendimento de um pedido de item reparável ao estoque, conhecido como BO (do inglês *Backorder*), resulta em indisponibilidade do sistema, uma métrica importante, do ponto de vista do suporte logístico, é o valor esperado de BO, designado por EBO (do inglês *Expected Backorders*), que é matematicamente expresso como uma função de s , de acordo com Sherbrooke (2004), conforme indicado na Equação 3. A quantidade de itens de giro s é a variável de decisão da gestão de estoques. É importante ressaltar que X é uma variável aleatória e que o EBO reflete a média de itens faltantes no longo prazo.

$$EBO(s) = \sum_{x=s+1}^{\infty} (x - s)P(X = x) \quad (3)$$

Pela Lei de Little, aplicada à gestão de estoque, podemos estabelecer uma relação entre o EBO e o WT, dada uma demanda média m , conforme expressa a Equação 4 (Little; Graves, 2008).

$$WT = EBO/m \quad (4)$$

Definidos os principais fatores de suportabilidade de um sistema, que afetam sua custo-efetividade, trataremos agora de uma métrica muito empregada para medir a eficiência do sistema de suporte e que relaciona os fatores acima abordados. Trata-se da disponibilidade, que pode ser conceituada como a probabilidade do sistema ou equipamento operar de forma satisfatória em qualquer ponto no tempo, quando empregado dentro de condições especificadas (Stapelberg, 2009).

A Equação 5 expressa que a disponibilidade é matematicamente uma função da confiabilidade (representada pelo MTBF), da manutenibilidade (representada pelo MTTR) e da gestão de reparáveis (representada por WT).

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR + WT} = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR + \frac{EBO}{m}} \quad (5)$$

O emprego de ferramentas computacionais destinadas à construção de modelos para otimização da gestão de estoques tem se difundido na indústria e no setor de defesa. Um exemplo é a ferramenta OPUS10© desenvolvido pela empresa sueca Systecon. Essa ferramenta é capaz de considerar diferentes cenários operacionais e perfis de utilização do produto, sendo possível avaliar alternativas de políticas de custeio e estruturas de suporte com base em sua custo-efetividade (Blanchard; Blyler, 2016).

Segundo Sherbrooke (2004), o OPUS10© incorpora a teoria VARI-METRIC, derivada da técnica conhecida como METRIC (*Multi-Echlon Technique for Recoverable Item Control*), proposta por Sherbrooke em um artigo seminal publicado em 1968.

A Systecon afirma que, além das aplicações já citadas, o OPUS10© pode ainda ser aplicado em análises de custo do ciclo de vida, na otimização da estratégia de suporte e em análises de sensibilidade (Systecon AB, 2022a).

Apesar do OPUS10 permitir uma modelagem bastante detalhada do sistema de suporte e da configuração do produto, principalmente em sua versão RDM (*Refined Data Model*), sua formulação matemática é baseada em distribuições estocásticas. Para a obtenção de modelos que agreguem a dinâmica dos cenários operacionais, a Systecon desenvolveu o SIMLOX©, uma ferramenta capaz de fornecer resultados considerando uma sequência de eventos gerados por simulação (Systecon AB, 2022b).

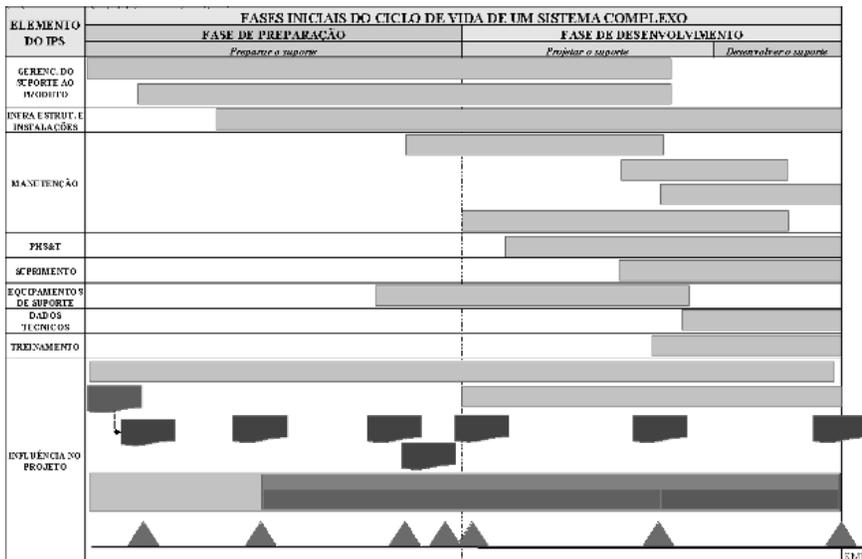
A hipótese deste trabalho é que, dada a aplicação da abordagem do IPS e de Engenharia de Sistemas no desenvolvimento de um produto, é possível obter um método que modele o suporte logístico ainda nas fases iniciais do desenvolvimento, considerando a estrutura de suporte e a dinâmica do cenário operacional, permitindo que decisões entre alternativas de projeto levem em consideração o custo do ciclo de vida (LCC), mais especificamente a parcela de custo de suporte em vida (LSC), com precisão, consciência situacional e capacidade de controle de métricas, apoiando decisões de projeto.

A modelagem do sistema de suporte está alinhada com o desenvolvimento do arcabouço de ferramentas digitais que consubstanciam o conceito de um Gêmeo Digital Embrionário com a capacidade de explorar e simular diversas condições de contorno de um sistema, neste caso, de suportabilidade logística, mesmo antes das fases finalísticas de seu desenvolvimento, conforme a abordagem explorada por Oliveira (2022).

Metodologia (e aplicação da metodologia)

O método proposto foi concebido para ser empregado durante as fases de preparação e de desenvolvimento, podendo ser aplicado em diversos momentos destas fases, conforme os dados são amadurecidos pelo processo de IPS. A Figura 5 indica os elementos do IPS que devem participar do método, as atividades destes elementos e o intervalo dentro do ciclo de vida do sistema em que se sugere a aplicação do método, visando apoiar as decisões a serem tomadas neste intervalo do desenvolvimento. O método proposto se enquadra como uma ferramenta da atividade de análise de custo do ciclo de vida, que pertence ao elemento influência no projeto, conforme foi representado na figura.

Figura 5: Posicionamento do método dentro do processo de IPS

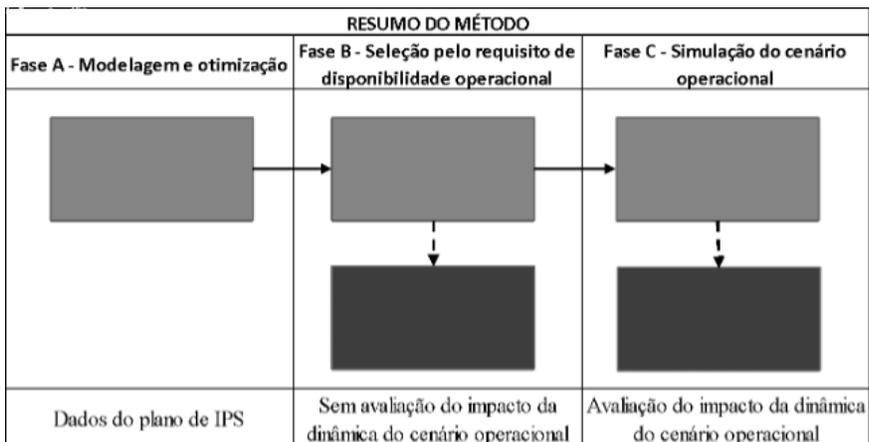


Fonte: Buch e Abrahão (2024).

Na medida em que as atividades dos elementos do IPS são executadas, a maturidade do sistema de suporte aumenta e mais dados são gerados e com menor incerteza. O método apresenta alta incerteza dos seus resultados no período anterior ao PDR (Preliminary Design Review), quando pouca informação sobre o plano de manutenção do sistema está disponível. Mesmo com alta incerteza, o método fornece resultados que podem ser analisados e apoiar decisões, desde que o risco da incerteza seja avaliado. A avaliação do risco da incerteza dos resultados não fez parte do escopo da pesquisa.

Definido o posicionamento do método proposto no ciclo de vida e no processo de IPS, será apresentado o método, que foi concebido com a composição de três fases, conforme indica a Figura 6.

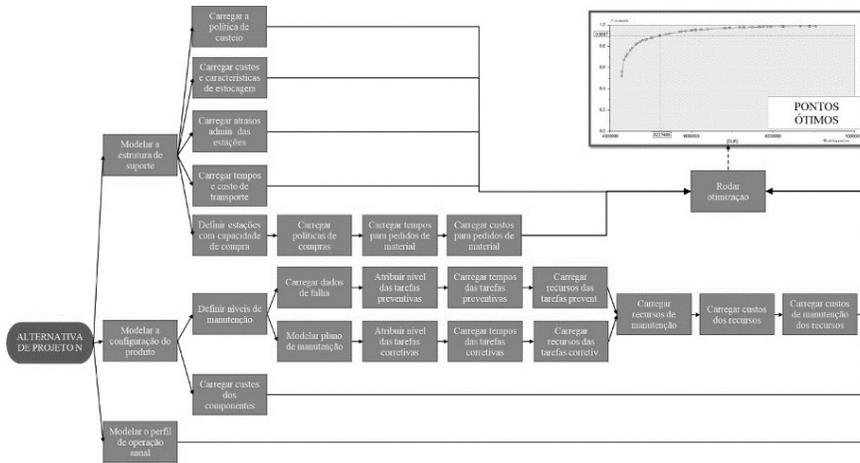
Figura 6: Resumo do método proposto



Fonte: Buch e Abrahão (2024).

A Figura 7 indica esquematicamente a Fase A, que é precedida da coleta de dados para compor a modelagem, dados estes oriundos das atividades do IPS e do CONOPS (Conceito de Operações).

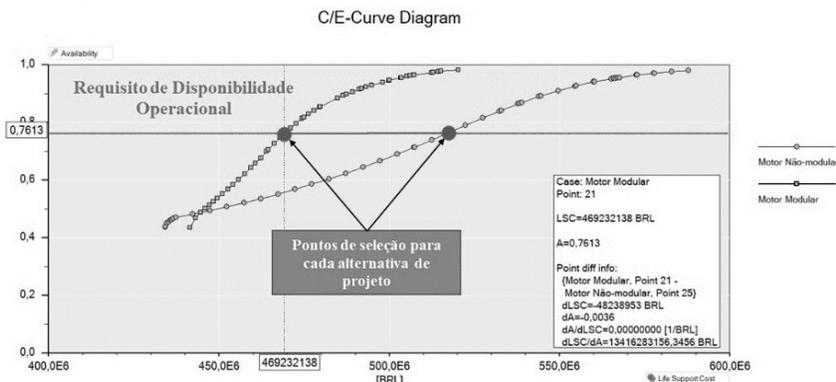
Figura 7: Representação da Fase A do método proposto



Fonte: Buch e Abrahão (2024).

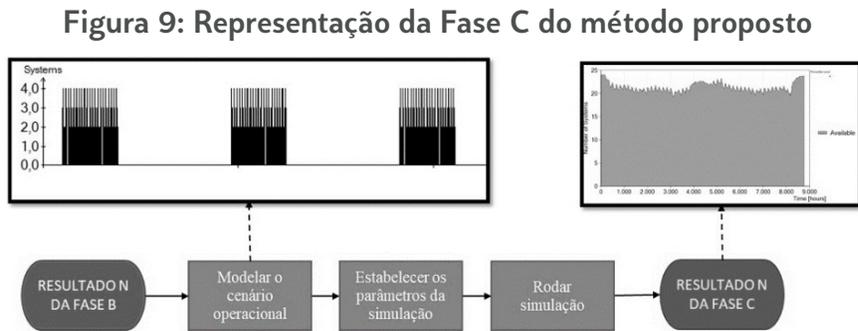
A Figura 8 indica esquematicamente como ocorre a Fase B do método, que consiste na seleção dos pontos ótimos obtidos na Fase A para cada alternativa de projeto. Os pontos são selecionados de acordo com o critério de disponibilidade operacional requerido para o sistema

Figura 8: Representação da Fase B do método proposto



Fonte: Buch e Abrahão (2024).

A Fase C, representada esquematicamente na Figura 9, é quando se insere a dinâmica do cenário operacional por meio de simulação, avaliando o impacto sobre o requisito de disponibilidade. Caso a Fase C aponte uma degradação na disponibilidade deixando-a abaixo do requisito, retorna-se à Fase B para a seleção de outra solução candidata, com maior disponibilidade que a anterior, submetendo-a à Fase C para avaliar se o requisito de disponibilidade é atendido. Este procedimento deve ser repetido até que se obtenha uma solução que atenda ao requisito ao ser submetida à simulação do cenário operacional.



Fonte: Buch e Abrahão (2024).

Para aplicar o método foi criado um caso de estudo que adotou como objeto um motor aeronáutico aplicado como propulsor de uma aeronave militar não tripulada (UAV – *Unmanned Aerial Vehicle*). As alternativas avaliadas foram: motor com o conceito de manutenção modular e motor não modular.

Um motor aeronáutico pode ser visto como sendo constituído por unidades básicas que formam o conjunto mecânico elementar, conhecido pelo termo em inglês *core engine*, que pode ser dividido em módulos individuais, tais como fan, compressor, câmara de combustão e turbina. Uma infinidade de modos de falha pode afetar cada uma destas unidades, podendo resultar na necessidade

da remoção do motor inteiro para reparo em oficina especializada. Nesse contexto surge o conceito de manutenção modular, que deriva da capacidade de isolar e reparar falhas no módulo onde ela ocorrer (Edmunds, 1978).

Para que um motor aeronáutico possa beneficiar-se do conceito de manutenção modular, o core engine deve ser constituído por módulos separáveis, permitindo que cada módulo possa ser substituído em um baixo nível de manutenção, dentro da estrutura de suporte, sem a necessidade de operações especiais como balanceamento. O objetivo é evitar o retorno do motor completo para uma oficina especializada (Safran Group, 2008).

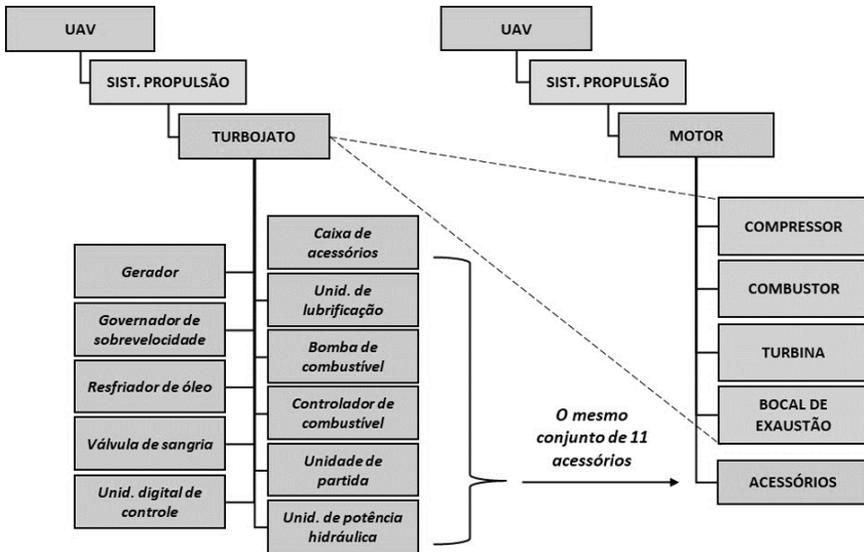
Para que a intercambialidade dos módulos seja possível, meios para possibilitar a fácil separação dos módulos devem ser incorporados ao projeto, exigindo também maior precisão nos processos de fabricação. Assim, espera-se que o custo dos componentes e do motor modular como um todo sejam superiores ao custo do motor não modular, sendo necessária a avaliação da relação custo-benefício. O método considera como custo o LSC e como benefício a disponibilidade operacional, que é um requisito a ser atingido.

As configurações para as alternativas de projeto a serem avaliadas e comparadas pelo método estão representadas na Figura 10.

Considerou-se uma frota de 36 aeronaves distribuídas em duas bases de operação com a estrutura de suporte indicada na Figura 11.

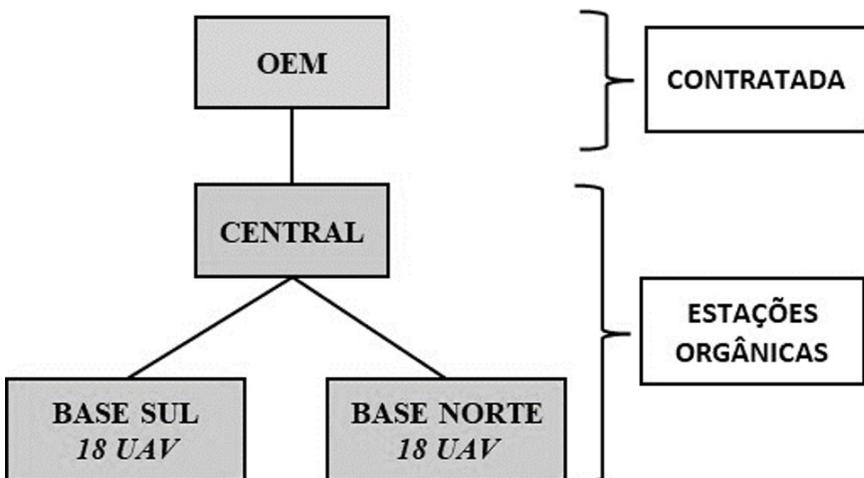
A política de custeio das estações da estrutura de suporte considerou que as bases operacionais e a estação central são orgânicas, ou seja, os recursos são custeados pelo operador. Já a estação indicada como OEM (*Original Equipment Manufacturer*) é uma oficina contratada, onde os recursos não são custeados pelo operador.

Figura 10: Estrutura de produto das soluções de projeto



Fonte: Buch e Abrahão (2022).

Figura 11: Estrutura de suporte



Fonte: Buch e Abrahão (2022).

Na Fase A é realizada uma otimização simultânea que executa a:

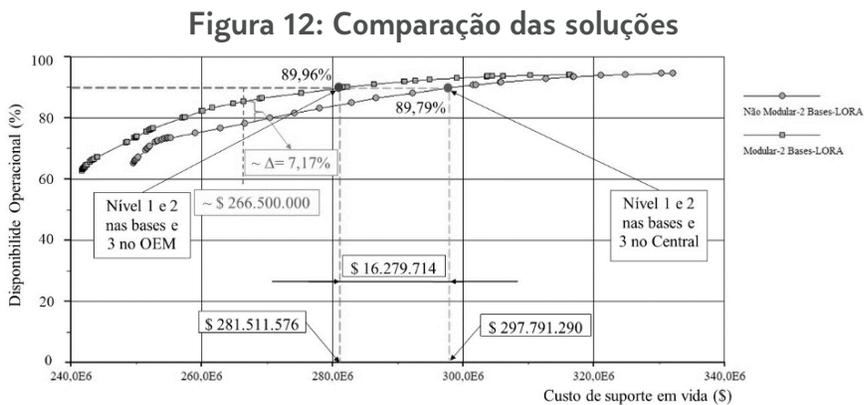
- Otimização da quantidade de itens reparáveis sobressalentes;
- Otimização da localização dos estoques nas estações da estrutura de suporte;
- Otimização da alocação dos níveis de manutenção na estrutura de suporte;
- Otimização da alocação dos recursos;
- Otimização da quantidade de recursos.

Para a otimização da Fase A empregou-se o *software* OPUS10© com a funcionalidade LORA-XT (*Location of Repair Analysis*). A solução resultante da Fase A apresenta-se graficamente por curvas que unem os pontos ótimos, motivo pelo qual é empregado o termo curva de máxima efetividade de custo.

Neste caso estudado a Fase C do método, que emprega o *software* SIMLOX©, não apresentou significativa degradação da disponibilidade para os pontos selecionados na Fase B, visto que ambas as alternativas foram submetidas ao mesmo cenário operacional que retratou um perfil de operação bastante regular. No entanto, o método pode ser aplicado para avaliar cenários operacionais consideravelmente distintos ou mais severos. Nestes casos a Fase C do método poderá apontar degradações consideráveis na disponibilidade operacional em relação aos resultados fornecidos pela Fase A do método.

Resultados e discussão

A Figura 12 apresenta as curvas de máxima efetividade de custo comparando o motor modular com o não modular. Na Fase B do método, foram selecionados, para ambas as alternativas, os pontos mais próximos do requisito de disponibilidade operacional definido para o estudo (90%). Constatou-se que o LSC do motor modular é aproximadamente 5,5% menor em relação ao motor não modular.



O método recomendou estratégias de suporte distintas para cada alternativa de projeto. Para o motor modular o método recomendou que os níveis 1 e 2 de manutenção fossem alocados nas bases operacionais e que o nível 3 fosse contratado com o OEM. Já para o motor não modular o método também recomendou que os níveis 1 e 2 de manutenção fossem alocados nas bases operacionais, porém com o nível 3 alocado na estação central.

Os resultados do método permitem uma comparação das parcelas do LSC de cada solução de projeto, conforme indica a Tabela 2.

Tabela 2: Comparação das parcelas do LSC

<i>DESCRIÇÃO DOS GRUPO E SUBGRUPOS DE CUSTO</i>	<i>MODULAR EM RELAÇÃO AO NÃO MODULAR</i>	<i>NÃO MODULAR Proporção dos Grupos e Subgrupos</i>	<i>MODULAR Proporção dos Grupos e Subgrupos</i>
CUSTO DE SUPORTE EM VIDA	94,5%		
Investimento total	55,6%	25,4%	15,0%
<i>Aquisição de estoque de giro</i>	78,1%	16,0%	13,2%
<i>Aquisição de recursos</i>	17,8%	9,5%	1,8%
Custos recorrentes totais	107,8%	74,6%	85,0%
<i>Transporte</i>	145,7%	11,1%	17,2%
<i>Manutenção corretiva</i>	95,9%	52,7%	53,4%
<i>Manutenção preventiva</i>	232,1%	5,3%	13,1%
<i>Manutenção/atualização de recursos</i>	22,8%	5,4%	1,3%

Fonte: Buch e Abrahão (2022).

Maiores detalhes do caso estudado podem ser encontrados em Buch e Abrahão (2022).

Conclusão

O método proposto tem como objetivo apoiar os estudos de trade-off conduzidos nas fases iniciais do desenvolvimento de um sistema complexo, fornecendo uma ferramenta que permite modelar o sistema de suporte e avaliar seu desempenho na fase de serviço, por meio de otimização e simulação. É conveniente lembrar que este método pode ser aplicado em momentos distintos do desenvolvimento, na medida em que os dados de suportabilidade são disponibilizados. Como o foco do trabalho está nas fases iniciais do desenvolvimento, posicionou-se o método no processo de IPS e no ciclo de vida do sistema, definindo a possibilidade de sua aplicação logo após o início da fase de preparação até o término da fase de desenvolvimento. O método consiste numa ferramenta para a atividade de análise de custo do ciclo de vida, que pertence ao elemento do IPS denominado de influência no projeto.

Para que a aplicação do método seja possível é essencial a integração da abordagem do IPS ao processo de Engenharia de Sistemas no desenvolvimento do produto, de forma que os dados para a modelagem sejam gerados, amadurecidos e atualizados pelas atividades do IPS.

O caso estudado mostrou que o método é eficaz para distinguir a custo-efetividade das alternativas de projeto relacionados a diferentes conceitos de manutenção, permitindo ainda a realização de análises de impacto sobre parcelas do LSC. No caso apresentado, que comparou o conceito de manutenção modular e o não modular para um motor aeronáutico, foi possível identificar que o conceito de manutenção modular apresentou um sistema de suporte mais eficiente, constatado por uma melhor relação custo-benefício, onde o custo considerado foi o LSC e o benefício a disponibilidade operacional. Neste caso, a introdução do dinamismo do cenário operacional por meio de simulação, Fase C do método, não indicou degradação da disponibilidade operacional em relação aos resultados da Fase A, de otimização, onde é empregado um modelo estático com eventos uniformemente distribuídos.

A baixa influência dos resultados da simulação para este caso era esperada, pois o estudo considerou o mesmo cenário operacional para ambas as alternativas em análise, e um perfil de operação bastante regular. No entanto, o método pode ser aplicado para avaliar cenários operacionais consideravelmente distintos ou com maior severidade, casos em que a Fase C do método torna-se muito relevante por evidenciar degradações da disponibilidade em relação aos resultados da Fase A.

Referências bibliográficas

- ABRAHÃO, F. T. M. *et al.* Development of the AeroLogLabTOOL®. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA OPERACIONAL E LOGÍSTICA DA MARINHA, *Anais [...]*, Centro de Análises de Sistemas Navais, Rio de Janeiro, 2019.
- ASD / AIA. *SX000i International procedure specification for Integrated Product Support (IPS) – Issue 3.0.* 2021. Disponível em: <http://www.sx000i.org/docs/SX000i%20Issue%203.0.pdf>. Acesso em: 12 dez. 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *ABNT NBR 5462: confiabilidade e manutenibilidade.* Rio de Janeiro: ABNT, 1994.
- BLANCHARD, B. S.; BLYLER, JONH E. *System Engineering Management.* 5. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2016. 554p.
- BLANCHARD, B. S. *Logistics Engineering and Management.* 6. ed. (Pearson New International Edition). Harlow: Pearson, 2014. 414p.
- BRASIL. Ministério da Defesa. Comando da Aeronáutica. *DCA 400-6: Ciclo de vida de sistema e materiais da aeronáutica.* Brasília, DF, mar. 2007. 75p.
- BUCH, D; ABRAHÃO, F.T.M. Método de apoio a decisões de projeto baseadas no custo do ciclo de vida e na estrutura de suporte. In: Simpósio de Aplicações Operacionais em Áreas de Defesa, 24. *Anais [...]*, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2022.
- DAU. *Integrated Product Support Element Guidebook.* Defense Acquisition University, 2011. Disponível em: <https://www.acqnotes.com/Attachments/Integrated%20Product%20Support%20Guidebook%20Dec%202011.pdf>. Acesso em: 24 abr. 2022.
- DAU. *Integrated Product Support (IPS) Elements Guidebook.* Defense Acquisition University, 2021. Disponível em: [https://www.dau.edu/pdfviewer?Guidebooks/Integrated-Product-Support-\(IPS\)-Element-Guidebook.pdf](https://www.dau.edu/pdfviewer?Guidebooks/Integrated-Product-Support-(IPS)-Element-Guidebook.pdf). Acesso em: 25 jun. 2022.

EDMUNDS, D. B. Modular engine maintenance concept considerations for aircraft turbine engines, *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, v. 50, n. 1, p. 14-17, Jan. 1978.

LITTLE, J. D. C. *et al. Building intuition: insights from basic operations management models and principles*. New York: Springer, 2008. Cap. 5, p. 81-100.

NASA. *NASA Systems Engineering Handbook*. 2016. Disponível em: https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/nasa_systems_engineering_handbook_0.pdf. Acesso em: 18 out. 2022.

OLIVEIRA, T. C. *Design of a tool for the integrated logistics support development of aerospace complex systems: embryo digital twin*. 2022. Dissertation (Master of Science) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2022.

RUSSELL, S. H. Supply Chain Management: More Than Integrated Logistics, *Air Force Journal of Logistics*, v. 31, n. 2, p. 55-63, 2007.

SAFRAN GROUP. *MAKILA 2A-2A1: Turboshaft engine*, Training notes, 2008.

SHERBROOKE, C. C. *Optimal inventory modeling of systems: multi-echelon techniques*. 2. ed. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2004. 332p.

STAPELBERG, R. F. *Handbook of reliability, availability, maintainability and safety in engineering design*. London: Springer, 2009. 827p.

SYSTECON AB. *OPUS10 User's reference*. Stockholm: Systecon AB, 2022a.

SYSTECON AB. *SIMLOX User's reference*. Stockholm: Systecon AB, 2022b.

Modelo de referência para avaliação de suportabilidade em aquisições de sistemas complexos de defesa, inspirado no conceito de gêmeos digitais

Leandro da Fonseca Assumpção¹

Antonio Celio Pereira de Mesquita²

Contextualização e definição do problema

O foco do trabalho recai sobre a aquisição de sistemas complexos de defesa e as dificuldades que um processo de seleção impõe quanto a como parametrizar análises de suportabilidade.

Em continuidade, o longo ciclo de vida apresentado por muitos desses sistemas recebe forte influência do seu elevado custo de aquisição. Como tais sistemas envolvem alta tecnologia e pequenos lotes (na grande maioria) o investimento para aquisição é maior e, por conseguinte, busca-se o alongamento de sua disponibilidade para o serviço para amortizar tal custo (Lambert, 2018).

Posto isso, observa-se que a necessidade de atualização dos sistemas complexos de defesa com o foco em desempenho operacional implica efeitos nas outras áreas ligadas ao desempenho do sistema na totalidade, em especial os aspectos ligados à suportabilidade do sistema. Esse fenômeno pode ocorrer tanto em processos de revitalização de sistemas existentes como na aquisição de novos sistemas.

¹ AeroLogLab-ITA (www.aerologlab.ita.br).

² AeroLogLab-ITA (www.aerologlab.ita.br). E-mail: celio.mesquita@gp.ita.br

O desafio de preservar a capacidade operativa no orçamento destinado à defesa é uma realidade no Brasil. Portanto, é vital serem desenvolvidas estratégias para viabilizar a aquisição de sistemas para que a missão finalística seja cumprida em um custo aceitável do ponto de vista logístico.

Lamentavelmente, a percepção de que é necessário para o bom desempenho do sistema uma visão integrada, modelando soluções para necessidades operacionais e logísticas desde a concepção do sistema não se mostra presente em uma parcela significativa de sistemas desenvolvidos (Abrahão, 2017a).

O conhecimento acadêmico acerca do Suporte Logístico Integrado oferece um robusto arcabouço para lidar com essas questões. Contudo, a concepção e o desenvolvimento dos sistemas podem sofrer interferências ou ruídos, prejudicando a implementação de tal conhecimento (Blanchard; Blyler, 2016).

Uma das situações em que isso pode ocorrer é durante a licitação, definição dos requisitos e posterior especificação de um sistema a ser desenvolvido. É comum existirem processos decisórios sobre requisitos que serão atendidos, limitados ou preteridos em função de outros, tratado na literatura como *trade-off*. Essas decisões podem ocorrer em diversas fases e podem degradar atributos significativos para a suportabilidade em função de atributos operacionais. Muitas das vezes isso é provocado pela visão focada em atender os requisitos operacionais na sua plenitude e a baixa percepção de que a degradação da suportabilidade do sistema afeta o seu desempenho na totalidade (Blanchard; Verma; Peterson, 1995).

Diante do exposto, é importante existirem estratégias para minimizar o risco de aquisição de sistemas dificilmente suportáveis do ponto de vista logístico, não só considerando as características inerentes ao seu projeto, mas também o contexto onde ele será utilizado.

Considerando que o processo de aquisição é o meio pelo qual o Ministério da Defesa (MD) e suas forças singulares obtém sistemas complexos, é necessário existirem estratégias direcionadas ao robustecimento desse processo em relação à aplicação e avaliação das boas práticas acerca do Suporte Logístico Integrado e da adequabilidade do sistema ao possível cenário de aplicação.

O entendimento mais claro das características e do desempenho de cada sistema concorrente do ponto de vista logístico minimiza o risco da aquisição de sistemas imaturos do ponto de vista da suportabilidade. Erros ou omissões nessa fase do processo podem se refletir durante toda vida útil do sistema (Abrahão, 2017b; United States, 2005; Vieira, 2016).

Abrahão *et al.* (2019) afirma que a maioria das organizações ligadas a sistemas complexos (desenvolvimento, suporte, manutenção, fornecimento de suprimentos e operadores) tem conhecimento muito raso ou inexistente dessas práticas. Isso também acontece no meio acadêmico, onde as principais referências na formação de profissionais na área de projetos de sistemas complexos, em especial as escolas de engenharia, não abordam com a profundidade necessária a temática da suportabilidade, principalmente acerca das atividades durante a concepção e desenvolvimento desses sistemas.

Dessa maneira, existe a carência de uma estratégia que auxilie a comparação dos sistemas concorrentes sob a ótica da suportabilidade durante o processo de aquisição, passível de ser comparada ao desempenho real após a aquisição. O cerne do problema repousa na falta ou pouca aplicação dos conceitos e boas práticas durante o processo de aquisição e o desencadeamento de ações, sob a ótica desses conceitos, das ações necessárias para gerenciar a implantação do sistema e todo conhecimento gerado durante o processo.

Assim, questiona-se: como adequar o processo de avaliação e seleção de propostas comerciais, aplicando a metodologia do suporte logístico integrado, para facilitar a implantação do sistema e preservando o conhecimento gerado?

O objetivo, então, do presente trabalho é modelar uma ferramenta, especificamente desenhada para aquisição de sistemas complexos de defesa, com a capacidade de delinear ações para seleção e classificação dos sistemas sob a ótica da sua suportabilidade.

Embasamento teórico

Um sistema é um conjunto de subsistemas e componentes que desempenham funções específicas, interagindo entre si organizadamente na direção de um objetivo comum (Incese, 2015). Utilizando a definição acima, pode-se inferir que são necessárias várias etapas, encadeadas em um processo sistemático, com a finalidade de desenvolver os elementos que darão ao sistema em si.

Esse conjunto de etapas, que vão desde a concepção até sua desativação, é tratado na literatura como ciclo de vida de um sistema. A identificação das necessidades é um dos passos mais importantes – elas justificam a existência do sistema em si. Essa atividade carece de profunda análise que se inicia na adequada identificação das fontes que irão gerar as necessidades. As partes interessadas devem expor as necessidades e expectativas para o sistema dentro de sua ótica. Após a coleta de todos esses dados, é feita uma filtragem e compilação para serem transformados em requisitos do sistema. A precisão e o nível de detalhamento dessas atividades são vitais para o sistema atender a sua missão definida. Falhas tanto na identificação das necessidades como das partes interessadas podem prejudicar decisivamente o sucesso do sistema (Parnell; Driscoll; Henderson, 2011).

O Suporte Logístico Integrado, do inglês *Integrated Logistics Support* (ILS), é uma abordagem acadêmica proposta para ações que foquem nas características logísticas do sistema desde sua concepção, cruzando todo ciclo de vida até o descarte. O grande objetivo é melhorar o desempenho do sistema em termos de suporte por meio de soluções de desenho, tecnologias, planejamento sistêmico e gestão integrada, com a finalidade de aumentar a disponibilidade, facilitar a manutenção, simplificar os processos ligados a logística, preservar as capacidades operacionais do sistema a um custo aceitável.

O guia SX000i define o ILS como um processo técnico onde atividades logísticas e os elementos (subáreas) da logística são planejados, adquiridos, implementados, testados e fornecidos em tempo adequado e com um bom custo-benefício. O guia ainda desmembra em quatro objetivos principais:

- Concepção do suporte com o foco em soluções no desenho do produto para reduzir atividades de rotina, manutenção, treinamento, tarefas de suporte e o custo do ciclo de vida enquanto otimiza a prontidão operacional.
- Suporte às soluções de projeto na concepção com foco na suportabilidade, desenvolvendo, testando e avaliando para garantir o desempenho ideal do sistema no cenário de aplicação a ele destinado.
- Garantia de suporte ao produto em operação conforme planejado e demandado.
- Finalmente, provisão/provimento do suporte necessário desde o começo até o final do Ciclo de vida do sistema, garantindo a continuidade e qualidade do suporte em face de mudanças e atualizações sofridas pelo sistema.

No Brasil, os processos de aquisição em geral realizados pela União são regidos pela Lei n.º 8.666, de 1993. Nessa lei, são estabelecidos formalmente os ritos processuais, objetivos, definições e atividades para as licitações executadas por qualquer órgão no âmbito da esfera pública, não importando a natureza ou porte, eliminando liberdades e flexibilidades nas compras, contratações ou qualquer atividade ligada a gastos de recursos públicos.

Entretanto, as especificidades dos sistemas de defesa e do contexto brasileiro trazem outras condicionantes para a construção desse cenário, como citado por Brick *et al.* (2018). Essas condicionantes delimitam o cenário de atuação dos Órgãos envolvidos na obtenção de sistemas complexos de defesa.

Embora a Lei 8.666, de 1993, possuísse dispositivos legais que tratem das necessidades e peculiaridades de produtos e sistemas complexos de defesa, foi necessária a criação de uma Lei que possibilitasse um tratamento mais específico para tal assunto. A lei 12.598, de 2012, trouxe uma evolução para o processo de aquisição e desenvolvimento de produtos e sistemas de defesa, estabelecendo disposições específicas para o objeto em questão e, além disso, propiciou a adoção de um regime tributário especial para as empresas consideradas de interesse estratégico para a defesa.

Uma ferramenta muito usual é a pesquisa de mercado por meio de consultas e pedidos de informações, conhecidos nesse universo também pela sigla RFI (do inglês *Request For Information*). São expedidos documentos com a intenção não só de coletar informações sobre as ofertas disponíveis no mercado em termos de equipamentos como também identificar possíveis fornecedores interessados em oferecer produtos.

O edital também funciona como um instrumento de uso corrente no mercado denominado Pedido de Oferta ou conhecido pela sigla RFP (do inglês *Request For Proposal*). A partir da

emissão do edital para possíveis participantes do certame e ampla divulgação pública, é feita a habilitação dos participantes, conferindo se os interessados atendem aos quesitos estabelecidos em edital e na legislação.

A presença de múltiplos critérios e alternativas no processo decisório de uma aquisição de sistemas complexos requer a utilização de métodos que tratam especificamente dessa condição peculiar. Para isso será apresentado nesta revisão um breve apanhado sobre a finalidade do AMD.

A necessidade de se aplicar AMD vem das características de alguns cenários de decisão. Ao se aliar mais critérios, muitas das vezes divergentes entre si, o processo de construção da decisão já se torna mais desafiador. A complexidade de combinar todos os critérios e as alternativas mostrou que a decisão muitas vezes não pode ser considerada um processo mecânico (Saaty, 2008).

O Método AHP é um dos mais difundidos para aplicação em processos de solução de problemas que envolvem decisões multicritério. Ele foi idealizado por Thomas L. Saaty com a proposta de prover uma estrutura para modelagem de problemas não estruturados (Saaty, 2008).

O AHP está estruturado sob a premissa de que comparações pareadas são mais fáceis de serem conduzidas pelo ser humano ao invés de comparações lineares envolvendo todos os critérios simultaneamente. Esse sequenciamento de comparações, utilizando uma escala intuitiva de importância, facilita a condução do processo a partir do momento que decompõe as comparações em partes menores, facilitando assim a construção do problema de decisão. A comparação par a par sob uma escala numérica também permite que seja atribuída importância com uma valoração tangível a elementos intangíveis ou subjetivos. Isso permite a inclusão de elementos não tão facilmente quantificáveis (SAATY, 2008).

Metodologia e aplicação

Esta pesquisa é de natureza aplicada, com objetivos exploratórios, por meio de uma abordagem qualitativa, envolvendo pesquisa bibliográfica, documental e estudo de caso. Definiu-se o problema, desenvolveram-se métodos e os métodos foram aplicados. Foi desenvolvido um Modelo de Referência para Avaliação da Suportabilidade (MRAS) em aquisições de sistemas complexos de defesa. Após a aplicação da metodologia que culminou no MRAS, uma série de testes e verificações são conduzidas para confirmar as funcionalidades do modelo. Em seguida, é apresentado um Estudo de Caso e a avaliação do modelo por especialistas no setor de aquisições de defesa.

Resultados e discussão

O trabalho propôs os seguintes Processos Funcionais (PF) do Modelo:

- PF-1: Avaliação Logística de Propostas Concorrentes;
- PF-2: Aprendizado Logístico para Implantação do Sistema Selecionado;
- PF-3: Aprendizado Logístico para Operação do Sistema; e
- PF-4: Aprendizado Logístico para Futuras Aquisições.

O autor descreve o fluxograma desses processos e os submete à apreciação de sete especialistas que os validam.

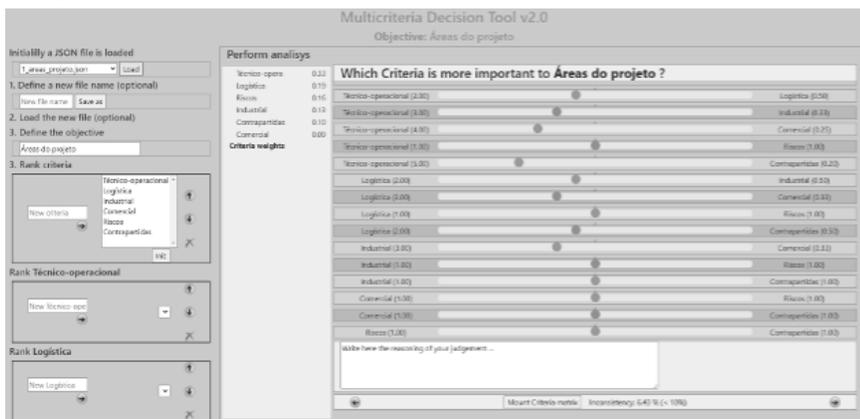
O autor segue um processo de validação da sua proposta, constituído das seguintes fases: Teste de Abrangência; Verificação Funcional; Experimentos na ferramenta AeroLogLabTOOL; Estudo de Caso; e Verificação com Especialistas.

As perguntas para os especialistas foram baseadas nos seguintes parâmetros:

- Conformidade com as legislações: A inadequação do modelo ao arcabouço legal inviabiliza sua aplicação real;
- Estrutura do modelo: O modelo deve apresentar estrutura clara e de fácil entendimento por pessoas com conhecimento na área;
- Abrangência: O modelo deve abarcar o arcabouço de conhecimento acerca do Suporte Logístico e ser integrado para robustecer o processo;
- Coerência: O modelo deve apresentar coerência com relação ao processo;
- Aplicabilidade: Além de ser aderente a legislação, o modelo deve ser aplicável;
- Relevância: O modelo deve contribuir para o aprimoramento do processo de aquisições de sistemas complexos de defesa.

Os resultados são apresentados em Assumpção (2020).

Figura 1: Imagem do programa gerado em função do trabalho



Fonte: <https://tool.aerologlab.ita.br/mcdm2/load>.

Conclusão

O trabalho de Assumpção (2020) propôs um arcabouço de ferramentas e processos para possibilitar a aplicação dos conceitos presentes no Suporte Logístico Integrado em processos de aquisição para suporte a sistemas complexos.

Também propôs um processo, que foi testado quanto a sua abrangência, consistência, coerência e adesão por meio de uma série de verificações funcionais, e de um estudo de caso envolvendo três propostas diferentes de sistemas. Esses sistemas foram selecionados por atender a uma demanda específica, tendo sido coletadas opiniões de sete especialistas com comprovada experiência e competências na seleção de fornecimentos.

A segunda contribuição descreveu o que tem que ser feito em um processo de seleção, e ainda descreveu e modelou suas entradas e saídas para a continuidade do melhor suporte possível. A terceira apresenta um fluxograma que facilita a rastreabilidade do processo. O modelo foi implementado como ferramenta em desenvolvimento no AeroLoglabTOOL® (tool.aerologlab.itabr) com a utilização de um algoritmo baseado no método AHP como ferramenta de seleção.

A principal limitação da pesquisa deve-se à obtenção de produtos prontos, disponíveis no mercado, e se deve à complexidade de se tratar a questão da comprar com desenvolvimento. Entretanto, esse é o próximo passo da pesquisa, tendo em vista o fortalecimento da Base Industrial de Defesa.

Referências bibliográficas

ABRAHÃO, Fernando Teixeira Mendes; MATA FILHO, José Nogueira da; Luiz Pinheiro Duarte Neto; MESQUITA, Antonio Celio Pereira de. Development of the AeroLogLabTool®.

SIMPÓSIO DE PESQUISA OPERACIONAL E LOGÍSTICA DA MARINHA, Centro de Análises de Sistemas Navais, Rio de Janeiro, [N.d].

BRASIL. Exército. Estado-Maior. *Catálogo de capacidades do Exército*. Rio de Janeiro: Exército, 2014.

BRASIL. Ministério da Defesa. Estado-Maior. Conjunto das Forças Armadas do Brasil. *Manual de boas práticas para a gestão do ciclo de vida de sistemas de defesa - Md40-M-01*. Brasília, DF: Ministério da Defesa, 2020. 177p.

BRICK, E. S. Logística de defesa: Uma subárea do conhecimento de importância estratégica para as ciências de gestão, *Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional*, v. 12, n. 2, p. 303-331, 2016.

INCOSE. *Systems engineering handbook*. New York: Wiley, 2015.

LAMBERT, K. R. Insights into beyond-life complex systems suffering from obsolescence, *South African Journal of Industrial Engineering*, v. 29, n. 2, p. 65-73, 2018.

PÂNGARO, E. L. de A. *Aquisição de sistemas militares complexos e o suporte logístico integrado: desenvolvendo um novo conceito*. Rio de Janeiro: Escola de Comando e Estado-Maior do Exército, 2018.

SAATY, T. L. Decision making with the analytic hierarchy process, *International Journal of Services Sciences*, v. 1, n. 1, p. 83-98, 2008.

Análise do plano do processo de certificação aeronáutica sincronizado ao desenvolvimento do plano integrado de suporte do produto

João Henrique Amorim de Almeida¹

Fernando Teixeira Mendes Abrahão²

Contextualização e definição do problema

O desenvolvimento de uma aeronave é um projeto crítico em segurança, do inglês *Safety*, altamente integrado e complexo, que exige a aplicação de diversas áreas de conhecimento conectadas entre si. Dentre essas, destacam-se os sistemas normativos de desenvolvimento que culminaram na proposição das normas ARP (*Aerospace Recommended Practice*) da *Society of Automotive Engineers* (SAE), as leis e regulamentos utilizados pelas autoridades aeronáuticas para de certificação de produtos e serviços aeronáuticos, e o conjunto de especificação de requisitos de suportabilidade para garantia do desempenho operacional satisfatório.

Entender e explorar este contexto do relacionamento entre Engenharia de Sistemas, as diretrizes de desenvolvimento, os planos, atividades e produtos de trabalhos da Certificação Aeronáutica com o arcabouço da Suportabilidade, pode contribuir para a redução de diversos problemas enfrentados no desenvolvimento, produção e operação de aeronaves certificadas, principalmente quando se trata de frotas ou algum tipo de operação com muitos ciclos diários.

¹ AeroLogLab-ITA (www.aerologlab.ita.br). E-mail: joaoalmeida@ita.br

² abrahao@ita.br

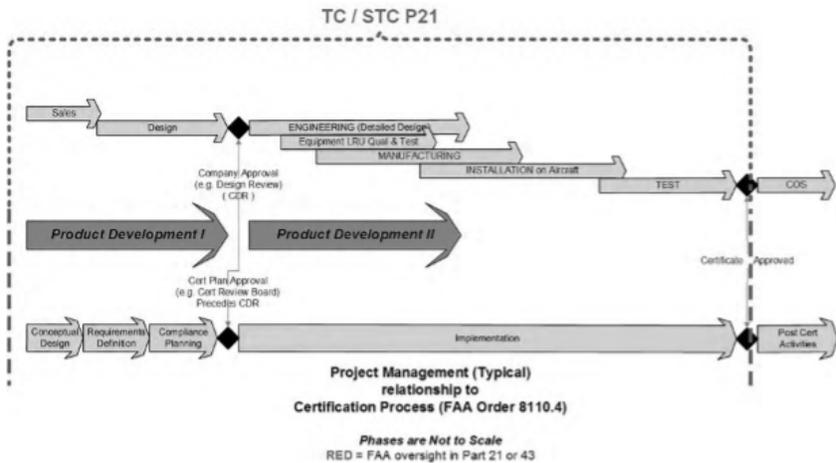
Contexto da Certificação Aeronáutica – Produto e Processo

Os diversos tipos de aeronaves precisam garantir a aeronavegabilidade, desde as de pequeno porte, acima de 2 assentos para passageiros, até as de grande porte com mais de 19 assentos. Além disso, novos modelos veem integrando o nicho de aeronaves que dominarão os céus das cidades, os chamados eVTOL – do inglês, *Electric Vertical Take-off and Landing*, com motorização elétrica, decolagem e pouso verticais. Essas aeronaves devem cumprir os mesmos regulamentos de aeronavegabilidade de aeronaves convencionais, como o RBAC 23, RBAC 25 e RBAC 27. Isso reforça ainda mais a necessidade de novas metodologias, procedimentos e práticas que resultem em melhores níveis de segurança, confiabilidade, disponibilidade e manutenibilidade.

Geralmente, o processo de certificação divide-se em quatro etapas, a conceitual, a de planejamento, implementação e pós-certificação. Cada autoridade de aviação propõe a sua diretriz no intuito de orientar os fabricantes.

Na Figura 1, do Order 8110.4 da Federal Aviation Administration - FAA, demonstra como são os relacionamentos entre as fases do processo de certificação com as típicas fases de desenvolvimento do projeto. No capítulo de revisão bibliográfica, será detalhado as tarefas de cada fase do processo de certificação. Observa-se na cor azul, como a autoridade enfatiza a importância de capturar os requisitos de aeronavegabilidade logo no início do projeto.

Figura 1: Comparação das Fases de Desenvolvimento com a certificação

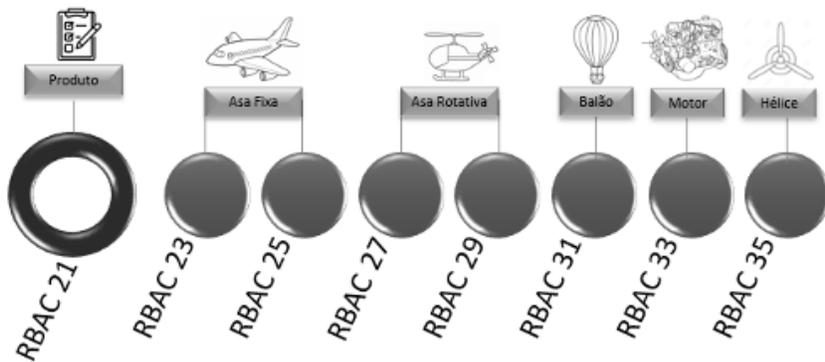


Fonte: FAA (2017).

Para cumprir com os requisitos de aeronavegabilidade de uma aeronave da categoria Normal do FAR 23, CS 23 e RBAC 23, é necessário um planejamento e análises nas fases iniciais do projeto, testes nas fases de produção e aplicação dos requisitos operacionais e de manutenção, para, assim, garantir que a aeronave tenha uma conformidade do projeto e uma operação segura (Almeida; Abrahão, 2021).

A Figura 2 apresenta os regulamentos aplicáveis a certificação de produtos aeronáuticos e da aeronavegabilidade.

Figura 2: Requisitos de produto e aeronavegabilidade na legislação aeronáutica brasileira



Fonte: Almeida e Abrahão (2023).

O RBAC 21, FAR 21 e CS 21 são regulamentos que descrevem como serão as regras para o produto aeronáutico, ligado, por exemplo, a elementos como de produção, projeto, certificados e modificações.

Os demais regulamentos, como o RBAC 23 e RBAC 25, são específicos para categorias de aeronaves ou produtos aeronáuticos, com requisitos direcionados ao produto, como: envelope de voo, peso, desempenho, cargas, equipamentos, ensaios e as instruções de aeronavegabilidade continuada.

Como esses requisitos são fator de entrada no mercado pelas Autoridades de Aviação Civil, as empresas colocam grandes esforços em mão de obra de engenharia e financeiros para cumprir com o mínimo requerido no arcabouço regulamentar e tentando reduzir os prazos de certificação, pois sem ela a empresa não consegue vender o seu produto e conseqüentemente não tem o faturamento esperado (Almeida; Abrahão, 2021).

A ANAC, com sua experiência em certificação de produtos aeronáuticos, estima que um processo de certificação da aeronavegabilidade, dos requisitos do RBAC 23 ou RBAC 25 pode durar de 3 a 5 anos. A partir disso, o produto começa a ter um certo nível de maturidade aceitável no fator *Safety*, isso após o requerimento inicial e no decorrer do tempo ir entregando o requerido no regulamento até a emissão do Certificado de Tipo (Almeida; Abrahão, 2021).

Com o anseio em certificar e vender logo, possivelmente a aeronave terá problemas na fase de operação, pois entregou um produto ao mercado sem atender-se aos requisitos de suportabilidade ou até mesmo os de aeronavegabilidade. Esse fato pode ser comprovado devido aos inúmeros processos de correções do projeto, dificuldades em serviço, manutenção corretiva, dificuldades de manutenção e suporte técnico, obsolescência, modificação de itens para a operação e modificação necessária decorrente de panes e falhas em algum sistema, acidentes e incidentes (Almeida; Abrahão, 2021).

Suportabilidade

Com o aumento do uso do transporte aéreo por diversos fins e tipos de usuários, tanto civil como militar, tornou-se necessário outros fatores além do *Safety*. Requisitos como o de disponibilidade e manutenibilidade tornaram-se tão importantes quanto o *Safety*, para garantir a boa relação custo-benefício, principalmente na fase de operação. A especificação Suporte Integrado do Produto, do inglês *Integrated Product Support* (IPS) do SX000i, bastante utilizado na aviação militar e pela Associação de Indústrias Aeroespaciais - AIA, possui recursos que elevam o nível da maturidade de suporte ao produto.

A especificação Suporte Integrado do Produto SX000i foi desenvolvida pela *Aerospace and Defence Industries Association of Europe* (ASD), pela *Aerospace Industries Association of America* (AIA), e pelo Departamento de Defesa Americano - DoD, e pode ser utilizada por todos os membros ou instituições de ensino, para sistemas complexos em quaisquer fases do ciclo de vida. Essa especificação do IPS é prescritiva e mais detalhada do que outras normas ou diretrizes no que se refere a suportabilidade.

Da mesma forma da certificação, definir os requisitos de suporte no início do ciclo de vida, pode aumentar a maturidade logística na entrada da fase de operação do produto. Esse fato vai de encontro ao tema central desse trabalho, que é abordar os requisitos de suporte logísticos concomitante ao processo de certificação.

Os requisitos de suporte logísticos não são compulsórios pelas autoridades de aviação. No entanto, os regulamentos aeronáuticos de certificação preveem itens que garantem ao produto um certo nível de manutenibilidade, confiabilidade e segurança. O problema começa surgir quando o fabricante não planeja e implementa uma robustez de elementos de suporte durante o desenvolvimento do projeto e da certificação, cumprindo assim somente o mínimo requerido nos regulamentos.

Geralmente, os requisitos de suportabilidade são requeridos pelos usuários, principalmente os que operam em grandes ciclos diários e também os mantenedores, ou seja, eles querem que o produto seja de fácil manutenção, confiável, com uma boa disponibilidade e a custos reduzidos. O problema aumenta quando esses requisitos são levantados já na fase de operação. Nesse caso, a probabilidade de o produto obter aceitação no mercado tornam-se mínimas.

Definição do problema

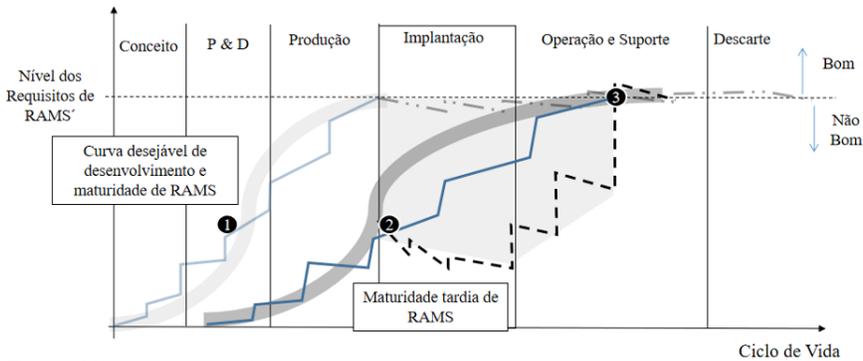
O problema de suportabilidade decorre de fatores que fazem degradar a prontidão do sistema e a relação custo-benefício do ponto de vista de suporte. Uma parte do problema de suporte é quando o produto é entregue ao primeiro cliente imaturo no que se refere ao suporte, com isso, uma série de problemas são identificados e podem acontecer a qualquer momento, degradando a relação custo-benefício, a disponibilidade e manutenibilidade do produto.

Esses problemas podem ocorrer em qualquer fase do ciclo de vida, e as consequências são agravadas quando é detectado na fase de operação da aeronave, assim, ocasionando em baixa disponibilidade e prejuízos ao operador.

Geralmente, os fabricantes e projetistas priorizam uma maior alocação de recursos financeiros no processo de certificação da aeronavegabilidade, no intuito de reduzir o tempo. Esse fato garantirá o fator *Safety*, no entanto, isso aumentará também a probabilidade de problemas de suporte no decorrer do ciclo de vida, principalmente na fase de operação. Isso porque os requisitos de aeronavegabilidade não priorizam fatores como o custo do ciclo de vida na fase de operação e elementos que contribuem com a disponibilidade do produto. Esses requisitos são mais utilizados em processos de certificação de sistemas complexos na área de defesa.

Em consequência do fato dessa priorização de certificar a aeronavegabilidade, aumentam as chances de o produto perder mercado, entrando tardiamente ou até mesmo nem entrar. Um dos fatores contribuintes da fragilidade logística na fase operacional acontece pela não abrangência dos requisitos de suporte nas fases iniciais do ciclo de vida. A Figura 3 ilustra que um produto entregue maduro do ponto de vista logístico entra na fase de operação com maior nível nas métricas de RAMS, Confiabilidade, Disponibilidade, Manutenibilidade e Segurança, do inglês *Reliability, Availability, Maintainability e Safety*.

Figura 3: Desenvolvimento atrasado da suportabilidade, com entrega da primeira aeronave imatura do ponto de vista de sua maturidade de suporte e de custo-benefício



Fonte: Notas de aula, Abrahão (2022).

Observa-se que na primeira curva o produto entrará na fase de operação cumprindo com os requisitos de suportabilidade. Já na segunda, apresenta-se um produto que entrou na fase de operação com pouca ou sem maturidade logística.

Na baixa maturidade das métricas de RAMS, acontece uma tendência de deslocamento da curva para a direita. Exemplos de sistemas com problemas de suporte são o Rockwell B-1B e o bombardeiro Convair B-58 Hustler. O primeiro com problemas de Confiabilidade e Manutenibilidade, resultando em baixa Disponibilidade e grande quantidade de homem hora de manutenção por hora de voo até atingir a maturidade. O segundo, um sistema complexo em termos de suporte, que nunca atingiu o nível de maturidade logística esperada durante sua fase operacional (Oliveira, 2022).

O problema de suporte logístico pode se tornar ainda mais grave quando se trata de aeronaves com muitos ciclos diários, como é o caso de companhias aéreas, táxis aéreos, serviços especializados como o agrícola, e escolas de treinamentos de

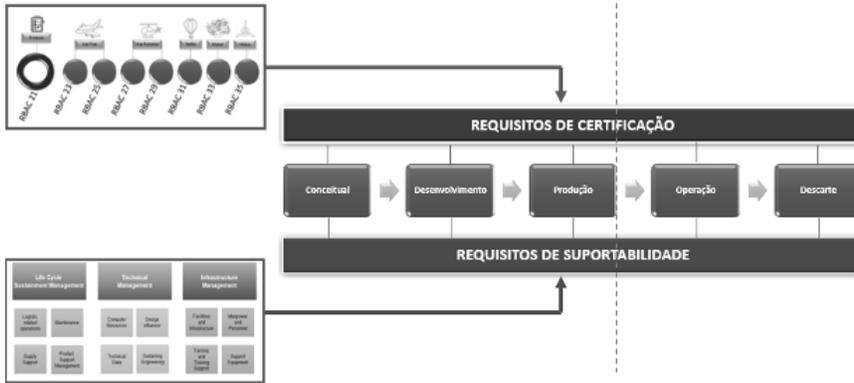
pilotos. Com esse problema, a relação custo e tempo se transforma em gargalos que poderiam ser evitados, tanto por parte de quem fabrica, utilizando métodos do conceito de suporte mais robustos, como por parte de quem compra, analisando com um crivo mais eficiente no processo de aquisição.

Com isso, somente os requisitos de aeronavegabilidade, com um dos seus principais elementos, a Instrução de Aeronavegabilidade Continuada, do inglês *Instruction Continued Airworthiness* - ICA, pode não ser capaz de garantir uma maturidade logística, uma vez que a ICA prioriza em sua maior parte o conceito de *Safety*.

Dentro do contexto apresentado, identifica-se uma lacuna na literatura, pois até onde pôde-se constatar, não há trabalhos publicados que visam abordar o plano do processo da certificação aeronáutica, principalmente com práticas específicas de suporte logístico ligados a aviação civil.

Uma pesquisa direcionada a exemplificar o plano do processo de certificação, agregado a um viés de Suportabilidade, através de um Plano do IPS, além do método de Nível de Maturidade do Produto, pode contribuir como uma referência nas fases iniciais de desenvolvimento do projeto, uma vez que, na certificação da aeronavegabilidade, não se enfatiza fatores como custo-benefício no ciclo de vida, disponibilidade, suprimentos, infraestrutura e outros elementos logísticos. A figura 4 ilustra de forma macro como os requisitos de suportabilidade poderiam ser abordados no ciclo de vida pelo menos concomitante ao processo de certificação de tipo.

Figura 4: Influência dos requisitos de suportabilidade e aeronavegabilidade nas fases do ciclo de vida de uma aeronave



Fonte: Abrahão (2023).

Embasamento teórico e hipótese(s)

O embasamento teórico desse trabalho está sobre os processos de engenharia de sistemas e também outras normas específicas para a aeronavegabilidade e suportabilidade. O processo da Engenharia de Sistemas veio com a necessidade de estruturar e resolver o problema das necessidades de diversos tipos de usuários.

Uma estruturação do processo baseado na engenharia de sistemas consegue atingir todas as camadas necessárias para o desenvolvimento de um produto. No entanto, a partir de um certo nível ou camada do processo vai depender da capacidade de desenvolvimento da empresa.

Com isso, foi necessário outras especificações e normas que possam complementar os processos da engenharia de sistemas, como um meio de descer as camadas, assim aprofundando nas funções e tarefas específicas de um determinado sistema.

Com essa lacuna da engenharia de sistemas, as indústrias, autoridades aeronáuticas tanto civis como militares e representantes da sociedade, desenvolveram metodologias e especificações obrigatórias e recomendadas. Por exemplo, requisitos ligados a *Safety* são obrigatórios demonstrar e validar o meio de cumprimento, já os ligados a requisitos funcionais requerido pelos usuários, como a suportabilidade, são tratados de forma recomendada.

Assim, o embasamento teórico sobre o *Safety* nesse trabalho está relacionado aos regulamentos de aviação civil ligados a aeronavegabilidade das agências reguladoras. Já os de suportabilidade, estão sobre o Integrated Product Support SX000i versão 3.0 e do U. S. *Department of Defense* – DoD.

Esses temas estão relacionados pois são partes integrantes do desenvolvimento de sistemas complexos como a aeronave. Com isso, foi pesquisado sobre como acontecem as tarefas dentro das fases dos ciclos de vida tanto da certificação como da suportabilidade. Para isso, é importante entender os seguintes pontos:

- A relação da engenharia de sistemas e o IPS.
- A relação entre a engenharia de sistemas e a certificação aeronáutica.
- Fases do Ciclo de Vida de sistemas.
- A certificação aeronáutica, com a história e evolução da certificação, as fases do processo de certificação e o plano do processo de certificação.
- A Confiabilidade no processo de certificação e no conceito de suporte do IPS.
- A Manutenibilidade na certificação e no conceito de suporte do IPS.

- A Disponibilidade no conceito de suporte e na certificação.
- A Suportabilidade no conceito de suporte do IPS, os elementos de suporte logísticos, o Plano de suporte integrado do produto (IPSP) e as atividades do plano do IPS no ciclo de vida.
- O Nível de Maturidade de Suporte (SML) do IPS.
- A análise de sincronização de tarefas da certificação aeronáutica com as do Plano do IPS.
- método Business Process Model and Notation (BPMN).
- O método de gerenciamento de projeto com Earned Valued.

Com base na revisão bibliográfica e com o objetivo de iniciar um entendimento e impactos do conceito de suporte sobre o processo de certificação, uma hipótese foi criada para resolver parte dos problemas de suporte no ambiente de desenvolvimento de uma aeronave.

Como as abordagens estudadas, a Engenharia de Sistemas e a Certificação Aeronáutica, não consideram de forma aprofundada e prescritiva o desenvolvimento de um plano integrado da suportabilidade em paralelo ao processo de desenvolvimento e certificação, espera-se definir um arcabouço com sinergias entre as tarefas do Plano de Suporte Integrado do Produto e o Plano do processo de Certificação e demonstrar se é possível evitar ou pelo menos apontar as consequências e impactos de qualquer atraso no desenvolvimento da maturidade logística. Isso através de um nível de maturidade do produto, baseado nas tarefas que foram e não foram realizadas, assumindo que esses atrasos terão uma contribuição linear. Ou seja, a maturidade vai aumentado de acordo com a quantidade de entregável cumprido ao longo do desenvolvimento do processo da suportabilidade.

Como prova de conceito, através do problema avaliado neste trabalho e do arcabouço estruturado, demonstrar-se-á com a modelagem em uma ferramenta de gerenciamento de projeto se é possível simular a realização das atividades de suporte concomitantes com a certificação, analisando os impactos de custo e prazos, como um meio de avaliar a viabilidade da integração dos recursos de suporte, e ser usado para auxiliar nos processos de tomada de decisão no desenvolvimento da suportabilidade no início e ao longo de todo o projeto.

Método e aplicação

Nesse Capítulo é apresentada a estratégia modelada para lidar com o problema de pesquisa, a hipótese e a elaboração da solução apontada no objetivo geral desse trabalho, apresentado no Capítulo 1.

O primeiro passo constituiu-se numa detalhada pesquisa pela literatura acadêmica sobre os processos de certificação aeronáuticos existentes, em todas as categorias de aeronaves, tanto civis como militares, com o objetivo de aumentar a compreensão dessa área do conhecimento, principalmente no que tange aos modos de planejamento para execução das tarefas do ciclo de vida. Além disso, realizado um aprofundamento na compreensão da suportabilidade dos sistemas complexos abordada no IPS, bem como todos os elementos necessários que garantem que o suporte logístico obtenha bons níveis de desempenho em sua fase operacional e como as tarefas vão acontecendo durante as fases do ciclo de vida

Como consequência da aquisição dos dados da etapa anterior, seguiu-se para um segundo passo, utilizando a metodologia de BPMN (*Business Process Model and Notation*, modelo de processo

de negócios), no intuito de enquadrar todas as informações e dados tanto da certificação da aeronavegabilidade, como no suporte logístico, estruturado em diagramas. Ela foi escolhida, pois, como se trata de duas abordagens com uma alta gama de informações, por possibilitar, no final, uma visualização do fluxo das tarefas com seus inputs e outputs.

Após isso, foi realizado uma análise qualitativa, item por item do plano, para verificar como as tarefas poderiam ser sincronizadas em cada fase do ciclo de vida, e com isso, verificar se realmente pode ser possível uma unificação ou compatibilidade de conceitos de planejamento.

Em seguida, a partir da sincronização das tarefas dos processos, um plano de referência foi modelado no Excel, atribuído como SNC CERT+IPS, com um detalhamento apontando e explicando o motivo da convergência entre tarefas.

Com o modelo dos planos sincronizados, o passo seguinte foi avaliar suas funcionalidades. O ideal para se comprovar a eficácia do modelo proposto seria a sua implementação em um processo real de certificação aeronáutica, possibilitando a coleta de todos os *inputs*, tarefas, *outputs*, restrições, premissas do projeto e dados da certificação. No entanto, o histórico apresentado pelas principais autoridades de aviação civil, relata que esse processo pode durar de três a cinco anos, dependendo da maturidade da equipe e porte do projeto.

Devido a tal complexidade, torna-se incompatível um processo de validação dessa envergadura com o período disponível para conclusão dessa pesquisa, assim, optou-se por três tipos de verificação:

- A primeira, de modo qualitativo, foi a validação de funcionamento do plano com integração dos elementos de

suporte logístico do Plano do IPS, modelado no software Monday, com as estratégias e sinergias de ambas as partes, verificando estimativas de quanto tempo e recursos para cada tarefa. Para essa análise, foi utilizado como premissa, um projeto de aeronave de nível 2 do RBAC 23, com escopo de capacidade entre 2 a 6 assentos para passageiros.

- A segunda verificação, de modo quantitativo, foi uma implementação do método Nível de Maturidade de Suporte – SML, utilizado como referência e, adequado ao modelo de plano citado anteriormente, para verificar a conformidade logística e medir o nível de maturidade do suporte no processo de certificação em cada etapa do plano.
- A terceira, deu-se pela utilização de um método de gerenciamento de projeto capaz de medir o desempenho do projeto com parâmetros de custo de homem hora de engenharia e tempo de cumprimento das tarefas. Junto ao gerenciamento de projeto, modelado no *Monday*, foi utilizado o método de *Earned Value*, para demonstrar todo o conjunto de tarefas, relacionando-se com custos e prazos, gerando o valor agregado, valor planejado, o custo real da tarefa e os índices de desempenho.

Com base nas três etapas anteriores, foi conduzida a análise dos resultados e uma discussão sobre a viabilidade de implementação da metodologia IPS, com o Plano do IPS no Plano de Certificação Aeronáutica, o Nível de Maturidade de Suporte do IPS com uma ferramenta de Gerenciamento de Projeto.

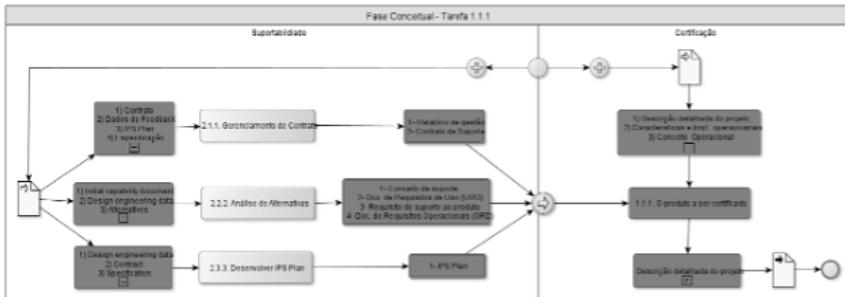
O encerramento se deu com a conclusão, onde é realizado uma visão geral abordando a aplicação das metodologias, a análise e discussão dos resultados. Além disso, são apresentadas as contribuições do trabalho e propostas de trabalhos futuros.

Resultados e discussão

A primeira metodologia aplicada foi BPMN, utilizando os dados de um processo de certificação de uma aeronave da categoria normal do RBAC 23 e da IS 21.001. Em paralelo, os dados de suportabilidade foram do Plano do IPS em sua versão 3.0. Em seguida foi realizada uma análise qualitativa verificando as convergências e relacionamentos entre tarefas dos dois planos dentro das três primeiras fases do ciclo de vida, a conceitual, desenvolvimento e produção.

A Figura 5 apresenta um exemplo de como foi modelado em formato BPMN, a primeira tarefa da fase conceitual: (1.1.1 O produto a ser certificado), para visualizar como é o fluxo e interação entre as tarefas, *inputs* e *outputs* do processo.

Figura 5: Tarefa 1.1.1 O produto a ser certificado, modelada em BPMN



Fonte: Almeida e Abrahão (2023).

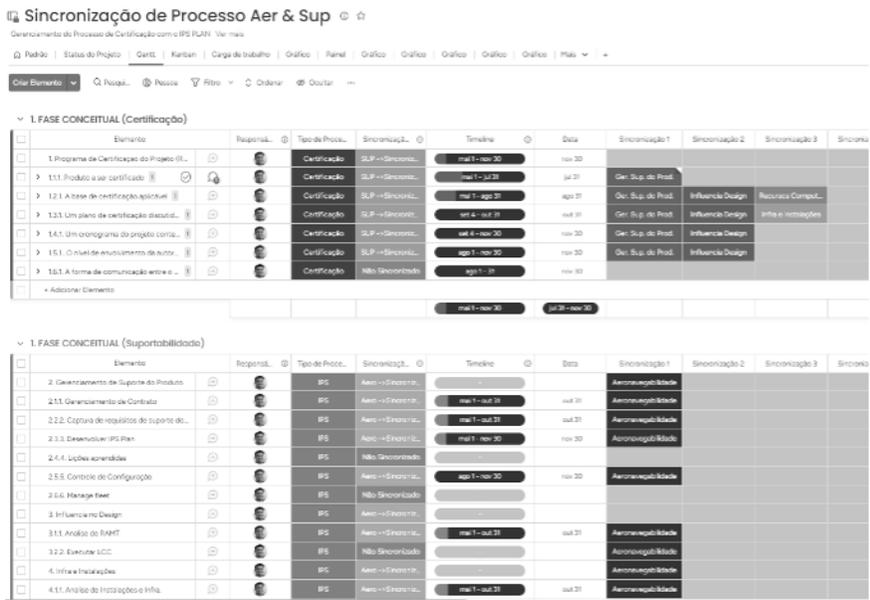
Como resultado desses dois métodos, obteve-se um arcabouço de tarefas no Excel, com *inputs*, *outputs* e uma explicação do motivo da convergência entre a tarefa do plano da certificação aeronáutica com o plano do IPS.

Com esses dados estruturados, foi possível modelar em uma ferramenta de gerenciamento de projeto, o *Monday*, com todas as tarefas, tanto as síncronas como as assíncronas, dentro de um

período mínimo de três anos, conforme o histórico de processos de certificação das agências reguladoras.

A Figura 6, apresenta uma parte da modelagem no *Monday*, da sincronização apenas da fase conceitual, pois devido a sua grande extensão e número de tarefas, impossibilita a completa visualização.

Figura 6: Parte da modelagem de gerenciamento do projeto, com eventos síncronos e assíncronos da certificação com a suportabilidade, modelado no Monday



Fonte: Almeida e Abrahão (2023).

Já a Figura 7, apresenta apenas as tarefas sincronizadas da fase conceitual da suportabilidade com as da fase de pré-requerimento da certificação, em formato de Gantt³, mostrando o cronograma e as tarefas relacionadas no tempo.

³ O formato típico do gráfico de Gantt lista as tarefas verticalmente à esquerda, enquanto uma linha do tempo percorre horizontalmente a parte superior do gráfico. As barras horizontais, ou barras de Gantt, representam o progresso, a duração e as datas de início e término de cada tarefa (Martins, 2022).

Figura 7: Representação em formato Gantt, das tarefas síncronas da certificação com o plano do IPS, modelado no Monday



Fonte: Almeida e Abrahão (2023).

Com esse método, foi possível verificar como as tarefas podem ser realizadas de forma concomitante dentro de um programa de desenvolvimento da aeronave.

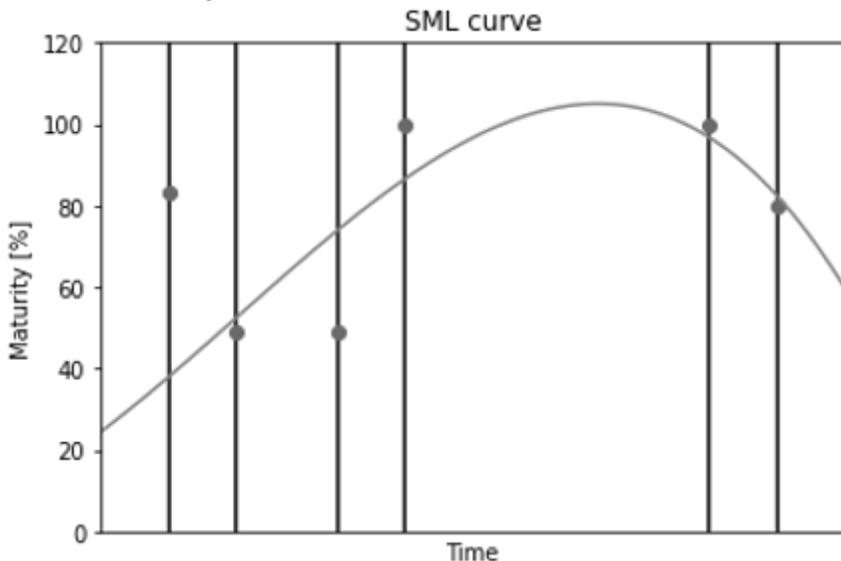
Em seguida, foi possível implementar a metodologia de Earned Value (Gestão de Valor Agregado), para medir o desempenho do projeto com parâmetros de custo e prazos.

Além disso, para medir a conformidade com a especificação do IPS do produto, foi realizado como referência a metodologia de Nível de Maturidade de Suporte proposta no IPS SX000i. Nesse método, a maturidade logística é medida em função do tempo, ligados diretamente com as atividades dos elementos do IPS, ou seja, a quantidade de tarefas executadas irá refletir diretamente no nível de suporte. Assim, será possível observar cenários do produto

no ciclo de vida, verificando como se comportará na fase operacional caso seja integrado as tarefas do suporte do IPS no processo de certificação. Como resultado, a partir dos resultados das análises realizadas nas etapas anteriores, foi possível encontrar um cenário, no qual 61% das tarefas do Plano do IPS foram sincronizadas nas três primeiras fases, concomitante ao processo de certificação.

Com isso, utilizando os dados da modelagem, com uma programação em *Python*⁴, foi possível visualizar o comportamento da curva da maturidade logística, caso realize 61% das tarefas, gerando uma curva em "S" com o deslocamento para a direita, constatando que o produto só irá obter um certo nível de maturidade já na fase de operação. Com esse fato, os problemas de suportabilidade são enfrentados pelos operadores e mantenedores.

Figura 8: Curva da Maturidade versus Tempo com a aplicação de 61% dos elementos de um plano do IPS integrado ao plano do processo de certificação aeronáutico



Fonte: Almeida e Abrahão (2023).

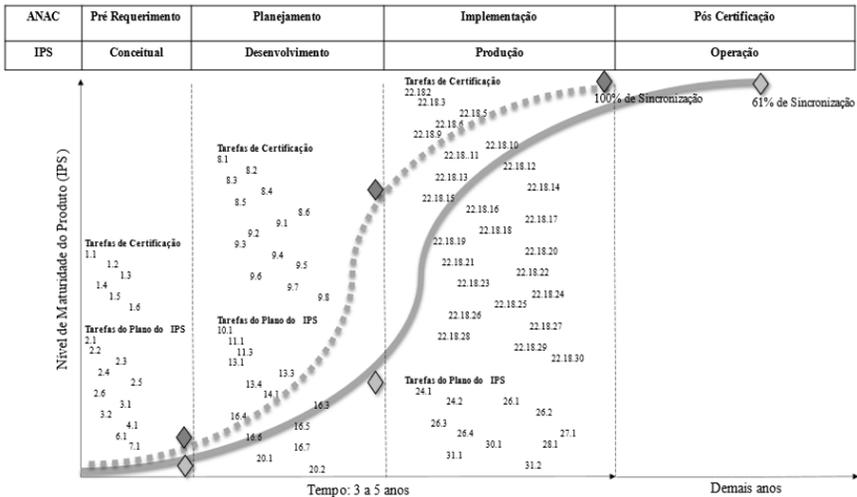
⁴ O Python é uma linguagem de programação amplamente usada em aplicações da Web, desenvolvimento de software, ciência de dados e machine learning (ML). Além de ser eficiente e de fácil manuseio, pode ser executada em muitas plataformas diferentes (Lopes, 2023).

A Figura 8 apresenta o resultado da programação que simula o estado da curva da maturidade no tempo. Cada ponto em azul representa a porcentagem de tarefas implementadas no marco de transição de uma fase a outra. Já na Figura 9 a linha sólida representa o comportamento da maturidade em função do tempo, enquanto a linha tracejada, por sua vez, ilustra como é o comportamento da curva entre o início do ciclo e os pontos de transição do fim da fase de produção para a implementação até o topo da curva onde se atingirá a maturidade no tempo. Na Figura 8, o primeiro ponto em azul representa a fase conceitual, o segundo o desenvolvimento, o terceiro a fase de produção, o quarto a implementação com a fase de operação, o sexto ponto, o fim da fase de operação, e o sétimo a fase de descarte.

A Figura 9 apresenta de maneira mais clara como as tarefas síncronas entre os dois planos podem atuar concomitantes dentro das fases do ciclo de vida do projeto. A primeira curva tracejada seria o modo desejado de cumprimento das tarefas do IPS para obter um bom nível de suporte ao adentrar na fase de operação. Já a segunda, um escorregamento da curva para a direita, já na fase de operação, ocasionando em uma imaturidade do ponto de vista de suporte, pois atrasou ou não cumpriu com o mínimo de tarefas recomendadas no Plano do IPS.

Uma limitação dessa representação, é que contém apenas as tarefas síncronas, ou seja, faltaram parte das tarefas de certificação e de suporte do IPS, bem como a fase de Descarte do ciclo de vida.

Figura 9: Desenvolvimento atrasado da suportabilidade em paralelo ao processo de certificação, com a entrega da primeira aeronave imatura do ponto de vista de suporte



Fonte: Almeida e Abrahão (2023).

Outro resultado importante desse trabalho foi a constatação das tarefas assíncronas entre os planos da suportabilidade com a certificação. Esse fato acontece devido aos *outputs* das tarefas de suporte, como exemplo o “Gerenciamento de Suporte Continuo, Suprimentos, Operações Logísticas e Treinamento”, que entregam itens relacionados ao ambiente operacional, ou seja, elas se afastam do escopo de *Safety* dos regulamentos.

Conclusão

Com essa pesquisa, foi possível verificar a importância da utilização do conceito de suporte prescrito no IPS, dentro do contexto do processo de certificação aeronáutica, pois ele fornece elementos que contribuem não só para o *Safety*, mas como na possibilidade de melhorar a performance da relação custo-benefício do produto na fase de operação.

Além disso, foi possível observar como o plano para o cumprimento de requisitos de aeronavegabilidade de uma aeronave da categoria normal do RBAC 23 convergiu com planos de requisitos de suportabilidade dentro do desenvolvimento de um projeto aeronáutico, limitado nas três primeiras fases do ciclo de vida. Foram verificadas também tarefas que não convergiram, e isso é uma das causas do escorregamento da curva da maturidade logística ao longo do ciclo de vida.

Com esse relacionamento entre tarefas, foi possível desenvolver um método capaz de medir o nível de maturidade de suporte do produto das tarefas síncronas do Plano do IPS com as do plano da certificação aeronáutica.

E por fim, através da modelagem na ferramenta de gerenciamento de sistemas, dentro do cenário de sincronização, foi possível observar como as tarefas poderiam ser realizadas de forma concomitante dentro de um período, com uma medição do índice de desempenho de projeto com parâmetros de custo e prazo, utilizando o método de Earned Value.

Portanto, através dos resultados dos métodos realizados, foi possível observar cenários e demonstrar como os recursos do IPS poderiam reduzir os problemas de suporte enfrentados por aeronaves certificadas, como a baixa prontidão, a elevada taxa de manutenção e aumento de custos operacionais, pois reforçou a utilização de algumas atividades semelhantes e apresentou tarefas e elementos de suporte não contempladas no plano do processo de certificação, como a de Engenharia de Suporte Continuado e a Suprimentos, ou seja, além do mínimo requerido pela autoridade.

Para trabalhos futuros, podem ser relacionadas variantes como o recurso financeiro, quantidade e capacidade da mão de obra, infraestrutura alocada e conhecimento dos riscos envolvidos. Podem ser modeladas também as tarefas de aeronaves de maior porte e mais complexas, e com mais níveis de detalhamento de trabalho. Além disso, pode-se expandir as atividades para as demais fases do ciclo de vida, como a operação e descarte.

Referências bibliográficas

AEROSPACE AND DEFENCE INDUSTRIES ASSOCIATION OF EUROPE. *International guide for the use of the S-Series Integrated Product Support (IPS) specifications*. [3.0]: ASD, 2021.

Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC). *Cartilha com Orientação para Certificação de Projeto de Tipo*. ANAC, 2019.

Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC). *Regulamento Brasileiro de Aviação Civil - RBAC 21: Certificação de Produto e Artigo Aeronáuticos*. ANAC, 2022.

Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC). *Regulamento Brasileiro de Aviação Civil - RBAC 23: Requisitos de aeronavegabilidade: aviões categoria normal*. ANAC, 2019.

BLANCHARD, BENJAMIN S. *Logistic Engineering and Management*, fifth edition.

FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION – FAA. *The FAA and Industries Guide to Product Certification*. FAA, 2017.

INCOSE, I. C. on S. E. *Systems engineering handbook*. 3t. ed. 2006.

U. S. Department of Defense – DoD. *DoD Guide for Achieving Reliability, Availability and Maintainability*. 2005

U. S. Department of Defense – DoD. *Product Support Manager – PSM Guidebook*. 2022.

PARTE 3

**GERENCIAMENTO
DA FROTA**

Uma abordagem de gerenciamento da manutenção de frota de aeronaves de defesa baseada em modelo de otimização de duas etapas

Sérgio Rebouças¹

Fernando Teixeira Mendes Abrahão²

Contextualização e definição do problema

O custo do elemento manutenção é certamente um fator importante no gerenciamento de operações aéreas. Em 2016, as divisões técnicas das 49 companhias aéreas cobertas pela análise da Associação Internacional de Transporte Aéreo (IATA) gastaram um total de USD 18,2 bilhões, com um custo de manutenção direta de USD 15,57 bilhões (Miller; Martin, 2017). No ano fiscal de 2018, o DoD gastou USD 49 bilhões em atividades de O&S de aeronaves (U.S. Government Accountability Office, 2020).

Em auditoria realizada pelo GAO (2020), foi observado que no período de 2011 a 2019 que, dos 46 tipos de aeronaves analisadas, somente um tipo conseguiu manter as metas de capacidade de cumprimento de missão em todos os nove anos.

O problema do planejamento da manutenção e de uso de aeronaves de defesa consiste em definir o sequenciamento de execução de atividades de manutenção de uma frota de aeronaves (programa de manutenção) de uma Organização com capacidade limitada de oficinas. Este sequenciamento deve levar em consideração a demanda de esforço aéreo abrangendo toda a fase de O&S, dentro do ciclo de vida do sistema.

¹ AeroLogLab-ITA (www.aerologlab.ita.br). E-mail: reboucas@ita.br

² E-mail: abrahao@ita.br

Para que o planejamento de parada das aeronaves para a execução das atividades de manutenção possa ser cumprido em conformidade com o cronograma, a alocação, ou designação das aeronaves para as missões, também deve ser criteriosamente analisada. Aeronaves com poucas horas remanescentes que têm sua parada programada em tempo mais distante devem voar menos. Aeronaves próximas ao dia de parada, com muitas horas remanescentes, devem voar mais.

O sequenciamento inadequado das atividades de manutenção, a alocação descoordenada das aeronaves e a abordagem temporal limitada a um curto período podem conduzir a um excesso de indisponibilidade da frota e de atividades de manutenção, degradando o cumprimento da missão e os indicadores de suportabilidade.

O uso de métodos e algoritmos de otimização podem contribuir para a definição da programação das atividades de manutenção e plano de uso da frota que minimizem ou maximizem uma relação custo-benefício desejada, como a capacidade de pronta-resposta, a disponibilidade, ou os custos de manutenção por exemplo.

Embasamento teórico e hipóteses

Assim como o custo elevado, o tempo necessário para a execução das atividades de manutenção de aeronaves podem chegar a 180 dias ou mais de duração. Apesar de haver diversos tipos de manutenção, o presente trabalho utiliza a divisão clássica de Blanchard (Blanchard; Blyler, 2016), que as divide em manutenção preventiva e corretiva.

Mais recentemente, surgiram os conceitos de manutenção preditiva, manutenção prescritiva e manutenção produtiva total.

A primeira trata basicamente da medida da condição de um equipamento, determinando se irá falhar em um período futuro definido (kumar; Shankar; Thakur, 2017). Faz parte da estratégia de manutenção baseada na condição (CBM, do inglês *Condition-Based Maintenance*), visto que as decisões de manutenção são tomadas baseadas no monitoramento das condições do respectivo sistema (Meissner; Meyer; Wicke, 2021).

A manutenção preditiva tem caráter preventivo, pois tem como finalidade prevenir uma falha iminente que poderia comprometer a capacidade operacional de uma aeronave ou até mesmo da frota (Lima *et al.*, 2017).

A manutenção prescritiva é considerada como nível máximo de maturidade e complexidade da manutenção baseada no conhecimento (KBM), do inglês *Knowledge-Based Maintenance* (Nemeth *et al.*, 2018). É definida como uma abordagem que utiliza informações sobre as projeções de degradação de um equipamento no intuito de expandir o conhecimento no âmbito do processo de tomada de decisão.

As oportunidades de decisão resultantes da projeção temporal das demandas de manutenção permitem a harmonização de atividades de manutenção por meio de algoritmos, reduzindo o tempo de espera dos serviços (Meissner; Meyer; Wicke, 2021). Dessa forma, ao considerar todos os demais aspectos envolvidos, uma estratégia de manutenção prescritiva permitirá uma análise holística e otimização da manutenção (Meissner; Rahn; Wicke, 2021).

Associado ainda à capacidade de predição da manutenção, surgiu o conceito da Manutenção Produtiva Total (MPT), do inglês Total Productive Maintenance (TPM), que busca simplesmente minimizar o tempo de parada das máquinas, procurando melhorar a eficácia global do equipamento. Essa estratégia foi bastante popularizada em virtude do uso massivo de sistemas inteligentes,

conectados e integrados, inserindo algum tipo de inteligência nas máquinas (Grijalvo Martín *et al.*, 2020).

Quando se trata de frotas de defesa, é necessária a aquisição de uma quantidade de aeronaves que seja suficiente para garantir a capacidade de defesa diante de uma ameaça definida. Frotas comerciais também podem trabalhar com aeronaves sobressalentes para garantir a operação em contingências, mas geralmente em menor escala que as de defesa.

No entanto, em condições de paz, essa quantidade pode ser bem acima do necessário para a manutenção da capacidade das tripulações. Isto pode gerar um excedente de aeronaves e conseqüentemente um esforço aéreo abaixo do ideal de uso da frota, entrando na condição de baixa utilização da frota.

O planejamento da manutenção deve especificar quando, onde, e quais as tarefas de manutenção devem ser realizadas em cada aeronave da frota. O seu objetivo é assegurar que a frota possa ser mantida eficaz e economicamente ao nível de prontidão desejado (*AeroSpace and Defence Industries Association of Europe*, 2018) ou uma relação custo-benefício favorável.

As complexidades envolvidas no planejamento da manutenção de aeronaves de defesa estão relacionadas, em sua maioria, na demanda de utilização destas, as quais variam em frequência e em intensidade de uso, o que dificulta a modelagem do problema. Esta complexidade faz com que o planejamento seja dividido em níveis: 1) estratégico, ou de longo prazo; 2) tático, ou de médio prazo; e 3) operacional, ou de curto prazo.

A literatura apresenta diversos trabalhos sobre o tema. O uso de métodos de otimização é recorrente, principalmente com os modelos lineares inteiros mistos (Sgaslik, 1994; (Pippin; Dell; Halwachs, 1998), Kozanidis (2006a), (Kozanidis; Skipis, 2006b),

Cho (2011), (Kozanidis; Gavranis; Liberopoulos, 2014), Verhoeff (2015) e Gavranis (2017).

Apesar dos métodos exatos serem reconhecidamente valiosos por entregarem um resultado comprovadamente ótimo, não é recomendado para problemas de grandes proporções, visto que a complexidade computacional impede que a solução seja obtida em tempo oportuno, podendo levar semanas, meses e até anos de processamento. Em virtude disso, outros autores buscam a utilização de métodos não exatos, reduzindo o tempo de processamento, ao mesmo tempo que apresentam boas soluções, como proposto por Abrahão (2006), Papakostas (2010), Basdere (2014), Jardel (2018), Peschiera *et al.* (2020) e Balakrishnan *et al.* (2021).

Independentemente do método de otimização utilizado, os estudos não abordam todo período de uso da frota, não levam em consideração a manutenção corretiva e tampouco as características individuais de manutenção das aeronaves. Os benefícios do alargamento do horizonte temporal foram evidenciados por Kozanidis *et al.* (2014) e a inclusão da manutenção corretiva, por exemplo, foi sugerida por Safaei e Jardine (2018) e Silva e Abrahão (2018).

Apesar da utilização de métodos exatos para a resolução do problema de planejamento de manutenção e de uso da frota, mesmo que restrito em suas condições de contorno, o problema realmente não pode ser resolvido facilmente de modo direto e pode apresentar características não lineares, dependendo de sua formulação. O problema apresenta complexidade combinatória exponencial e sugere a utilização, ora de métodos exatos, ora de procedimentos aproximados.

Tendo em vista o que foi apresentado, conclui-se que a modelagem para a solução do problema em tela deva ser feita com o uso combinado de métodos exatos e procedimentos meta-heurísticos, utilizando as vantagens de cada um de acordo com a sua aplicabilidade.

Apesar de focar em outros aspectos do planejamento da manutenção, outros trabalhos recentes também têm utilizado métodos de otimização em duas (Qin *et al.*, 2020b; Shahmoradi-Moghadam; Safaei; Sadjadi, 2021; Shaukat *et al.*, 2020) ou mais etapas (Deng; Santos, 2022; Deng; Santos; Verhagen, 2021; Witteman; Deng; Santos, 2021).

Metodologia (e aplicação da metodologia)

O estudo será limitado a um sistema aeroespacial complexo, uma frota específica de aeronaves de defesa. O escopo do trabalho está relacionado à fase de operação e suporte, considerada a mais importante dentro do ciclo de vida de um sistema complexo. Dentro da fase de operação e suporte, serão consideradas as atividades associadas ao planejamento de manutenção preventiva e corretiva de uma frota de aeronaves, em atendimento a uma demanda específica de esforço aéreo e sua distribuição dentro das escalas ou programações de voo (plano de uso).

O contexto de aplicação apresenta a frota de aeronaves e suas características de manutenção, além das características operacionais, ambiente de operação, horizonte temporal, premissas e condições de contorno. Para este trabalho, o planejamento estratégico ou de longo prazo abrange toda fase de O&S. Dessa forma, garante-se que o estado ou custo da frota após esse horizonte temporal não constitui fator de impacto significativo para a gerência da organização ou empresa.

A metodologia consiste em uma otimização de duas etapas, seguida de uma simulação para complementar a avaliação da disponibilidade (Ao) e confiabilidade da programação (SR).

Na primeira etapa, é aplicado um método exato de otimização, a programação linear inteira binária (PLIB). Os

parâmetros e restrições de manutenção e de utilização da frota são modelados em alto nível. O ótimo global é obtido em relação ao dimensionamento da manutenção e à utilização individual da frota para todo o período de O&S, o planejamento de longo prazo ou estratégico, assegurando a melhor distribuição do esforço aéreo para as aeronaves em todo o período de uso.

A redução do tempo de parada conduz ao aumento da Ao e da SR. Esta etapa refere-se ao planejamento estratégico ou de longo prazo e pode ser considerado um dimensionamento de manutenção e da utilização da frota. A utilização do método exato, nesse momento, vai garantir que a solução represente a referência de uso ótimo da frota em toda fase de O&S.

Posteriormente, é aplicada uma meta-heurística. Será utilizada a Busca em Vizinhança de Grande Porte (LNS) para adaptar o planejamento estratégico às variações e restrições dos níveis tático e operacional (sazonalidades). Esta fase verifica a viabilidade ou quão perto do ótimo global se pode chegar, por meio do ajuste do programa de manutenção e utilização da frota. Busca-se priorizar as atividades de manutenção em períodos de menor demanda de esforço aéreo levando em consideração o planejamento estratégico da manutenção e o plano de uso.

A implementação dos algoritmos de otimização para definição do programa de manutenção preventiva de uma frota de aeronaves, ao longo de todo o seu ciclo de vida operacional (longo prazo), permitirá o conhecimento da solução ótima global, em relação à minimização da indisponibilidade (*downtime*) da frota por manutenção.

Finalmente, para complementar a avaliação dos resultados, são realizados testes estatísticos em ambiente simulado. As simulações comparam a disponibilidade e a confiabilidade da programação entre o novo modelo e o método de planejamento

convencional, o SSSM/FIFO com distribuição uniforme das horas de voo na frota. As simulações são realizadas baseadas no histórico operacional de uma unidade aérea real de helicópteros de médio-porte, com as distribuições de probabilidade associadas.

Resultados e discussão

Dimensionamento da frota e da manutenção

Como resultado da primeira etapa, têm-se o dimensionamento do esforço aéreo que cada aeronave deverá consumir, bem como a previsão do tempo total de downtime e inspeções a serem realizadas para cumprir o respectivo esforço aéreo. É o planejamento estratégico, de longo prazo, com o dimensionamento ótimo do uso e da manutenção da frota.

No Quadro 1, pode-se comparar o downtime total calculado a partir do planejamento convencional e o novo modelo otimizado, considerando apenas a manutenção preventiva. O planejamento convencional prevê a distribuição uniforme de esforço aéreo para todas as aeronaves, o que gera um total de 12.240 dias de atividades de manutenção preventiva, garantindo no máximo 81,37% de disponibilidade média da frota.

Quadro 1: Resumo dos resultados do planejamento de longo prazo da manutenção preventiva

Downtime (Dias)				
Frota	Convencional	Proposto	Ganho	Ganho (%)
12 Anv	12.240	11.495	745	6,09%
	Disponibilidade Média			
	81,37%	82,50%	1,13 pp	

Fonte: Rebouças e Abrahão (2024).

Já no planejamento otimizado, com uma distribuição heterogênea do esforço aéreo, são necessários 11.495 dias de atividades de manutenção, garantindo no máximo 82,50% de disponibilidade.

Observa-se, portanto, uma economia total de 745 dias (mais de dois anos) de manutenção ao longo dos 15 anos de operação, em torno de 50 dias (um mês e meio) a menos de manutenção por ano de operação, ou 6,09% de redução do downtime da frota. Dividindo pelo número de aeronaves, seriam 4 dias de economia por ano por aeronave ou uma oficina trabalhando por pouco mais de dois anos de forma ininterrupta.

Distribuição do esforço aéreo e da manutenção

Além do dimensionamento da manutenção necessária para o cumprimento da demanda, a primeira etapa gera a distribuição de esforço aéreo da frota e de manutenção. O Quadro 2 mostra de forma detalhada o resultado da primeira etapa, já considerando também a manutenção corretiva individual. Nota-se a distribuição heterogênea do esforço aéreo (FHR), com seu respectivo downtime acumulado (T.D), média de esforço aéreo a ser voado por ano (FHR/Ano), disponibilidade (Ao) e quantidade de inspeções de 50, 100, 200 e 1.000 horas.

Observa-se que a ACFT1 foi alocada com o mínimo de esforço aéreo possível (50h). Mesmo não realizando nenhuma manutenção preventiva teria um acumulado de 440 dias de manutenção, referente à manutenção corretiva. No extremo oposto temos as ACFT8, ACFT11 e ACFT12 voando 2.600, 3.000 e 3.000 respectivamente.

Essa distribuição faz sentido em virtude da relação MTTR/MTBUMA. A otimização vai alocar menos horas para as aeronaves

com os piores indicadores de manutenção corretiva e mais horas para as aeronaves com os melhores indicadores.

Quadro 2: Resultados da otimização da primeira etapa considerando parâmetros de manutenção preventiva e corretiva individual

Aeronave	FHR	T. D	FHR/Ano	Ao	IN50	IN100	IN200	IN1000
ACFT1	50	440	3	92%	0	0	0	0
ACFT2	200	532	13	90%	2	1	0	0
ACFT3	200	516	13	91%	2	1	0	0
ACFT4	200	523	13	90%	2	1	0	0
ACFT5	200	532	13	90%	2	1	0	0
ACFT6	200	543	13	90%	2	1	0	0
ACFT7	2200	2548	147	53%	22	11	8	2
ACFT8	2600	2937	173	46%	26	13	10	2
ACFT9	200	524	13	90%	2	1	0	0
ACFT10	2200	2511	147	54%	22	11	8	2
ACFT11	3000	3113	200	43%	30	15	12	2
ACFT12	3000	3030	200	45%	30	15	12	2
	14250	17747	950	73%	142	71	50	10

Fonte: Rebouças e Abrahão (2024).

A programação e dimensionamento da manutenção convencional (a nível estratégico, tático e operacional) procuram equalizar a distribuição de FH entre as aeronaves da frota. Ou seja, todas as aeronaves devem voar o mesmo número de horas, o que daria algo em torno de 1.187,50 (1.188) horas por aeronave, ou 79,17 horas por ano por aeronave.

Pode-se observar no Quadro 3 a distribuição baseada no método convencional, com distribuição uniforme de esforço aéreo. A ACFT1 teria um downtime acumulado extremamente elevado, dada a sua característica individual de manutenção corretiva (relação MTTR/MTBUMA).

Quadro 3: Resultados do método convencional considerando parâmetros de manutenção preventiva e corretiva individual

Aeronave	FHR	T. D	FHR/Ano	Ao	IN50	IN100	IN200	IN1000
ACFT1	1188	3040	79	44%	12	6	4	1
ACFT2	1188	1785	79	67%	12	6	4	1
ACFT3	1188	1693	79	69%	12	6	4	1
ACFT4	1188	1734	79	68%	12	6	4	1
ACFT5	1188	1787	79	67%	12	6	4	1
ACFT6	1188	1849	79	66%	12	6	4	1
ACFT7	1188	1503	79	73%	12	6	4	1
ACFT8	1188	1473	79	73%	12	6	4	1
ACFT9	1188	1739	79	68%	12	6	4	1
ACFT10	1188	1483	79	73%	12	6	4	1
ACFT11	1188	1370	79	75%	12	6	4	1
ACFT12	1188	1338	79	76%	12	6	4	1
	14250	20793	950	68%	144	72	48	12

Fonte: Rebouças e Abrahão (2024).

Portanto, a primeira observação importante diz respeito à distribuição do esforço aéreo da frota. Para uma FHR de 14.250:00 h (Manutenção completa com parâmetros individuais da frota), observa-se no Quadro 3 que enquanto uma aeronave voará apenas 50:00 h outras consumirão até 3.000:00 h (02 aeronaves). Voar 50:00 h em um período de 15 anos implica uma série de medidas do ponto de vista de manutenção. A aeronave entra na condição de baixa utilização, sendo necessária a intervenção conhecida como estocagem. A estocagem pode gerar custos extras de recurso humano, de material e pode tornar a aeronave indisponível, visto que os procedimentos para a retornar às condições operacionais podem extrapolar o tempo de pronta-resposta exigido, dependendo das características próprias da frota.

Outra grande vantagem proporcionada pela distribuição não homogênea do esforço aéreo na frota trata da curva de aprendizagem e maturidade logística e operacional. Na medida que algumas aeronaves são selecionadas para consumir grande quantidade de horas de voo, estas tornam-se “pilotos”, como no caso das ACFT11 e 12, com uma média de 200h por ano.

Estas aeronaves podem antecipar problemas de operação e suportabilidade não previstos inicialmente no projeto. Desta forma, pode-se corrigir estes problemas no restante da frota antes que aconteçam, minimizando o seu impacto.

Neste sentido, indicadores logísticos e operacionais, aspectos de confiabilidade, disponibilidade, manutenibilidade e segurança de voo podem ser observados e analisados de forma antecipada.

Os resultados destas análises podem gerar melhorias a serem implementadas no restante da frota antes que cheguem em uma possível situação crítica, minimizando ou eliminando riscos em tempo hábil.

Segunda etapa – LNS

A segunda etapa trata de um modelo de otimização de planejamento de manutenção de aeronaves de médio/curto-prazo integrado ao de longo-prazo.

Os outputs da primeira etapa se tornam inputs da segunda, juntamente com os valores médios históricos de demanda de esforço aéreo com as sazonalidades mensais.

Para construir a solução inicial, soma-se o esforço aéreo diário de cada aeronave até completar o ciclo de manutenção física. Aloca-se a aeronave para manutenção no período

correspondente ao tempo de duração da respectiva inspeção e, ao término, retorna com todas as horas disponíveis até o próximo ciclo de inspeção. Repete-se o ciclo até atingir o esforço aéreo previsto para a aeronave voar até o final da fase de operação e suporte, conforme definido na otimização da primeira etapa.

Após a construção da solução inicial obtém-se o programa de manutenção definido para toda a fase de operação e suporte, baseado na demanda sazonal mensal do esforço aéreo e distribuição do esforço aéreo de cada aeronave (resultado da primeira etapa). Posteriormente inicia-se a otimização da segunda etapa, conforme já detalhado na metodologia. Como resultado da segunda etapa, obtém-se o calendário de manutenção preventiva

Programação da manutenção

Os resultados da otimização da frota de helicópteros com doze aeronaves, voando 14.250 h em quinze anos de operação e considerando somente as manutenções preventivas, estão apresentados na Figura 4.

Pode-se observar os recortes temporais comparando o resultado do planejamento convencional da manutenção com o planejamento otimizado da segunda etapa, na perspectiva das oficinas.

As três primeiras linhas dos gráficos, representando uma oficina cada, tratam do planejamento convencional, enquanto as últimas três, o planejamento otimizado. Cada bloco representa uma atividade de inspeção e sua largura representa o tempo de duração da atividade, sendo de 21, 28, 105 e 180 dias para essa frota.

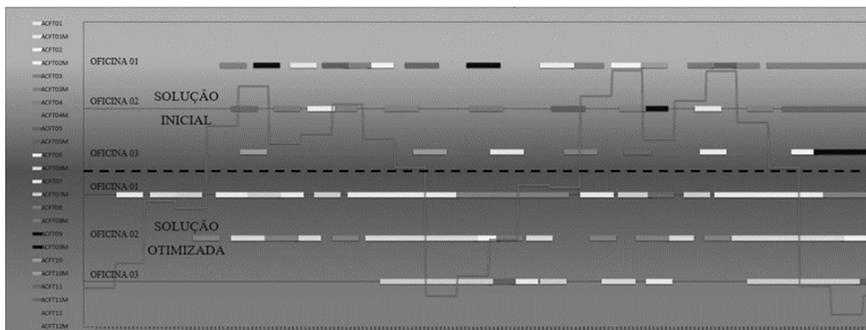
As aeronaves estão diferenciadas por tons de cinza, conforme legenda. Portanto, a ACFT12 por exemplo, está alocada de forma distribuída nas três primeiras oficinas, no planejamento

convencional. A mesma aeronave mantendo a legenda (ACFT12M, "M" de melhorada), teve sua alocação alterada pela otimização, já redistribuída nas três últimas linhas.

Pode-se observar que as inspeções foram "deslocadas" para os períodos de menor demanda de esforço aéreo, também representados pelos "vales" na linha segmentada que cruza o gráfico no eixo das abscissas.

Outro ponto interessante é a visão holística do planejamento abrangendo todo o período de O&S. Os métodos atuais, conforme já apresentado, limitam-se a no máximo um dos recortes (até dois anos). Isso implica uma visão míope e limitada, visto que a otimização de um único período pode gerar impactos irrecuperáveis em momento posterior.

Figura 4: Planejamento convencional da manutenção X otimizado - Dia 1 a 765



Fonte: Rebouças e Abrahão (2024).

Simulação de cenários para os testes

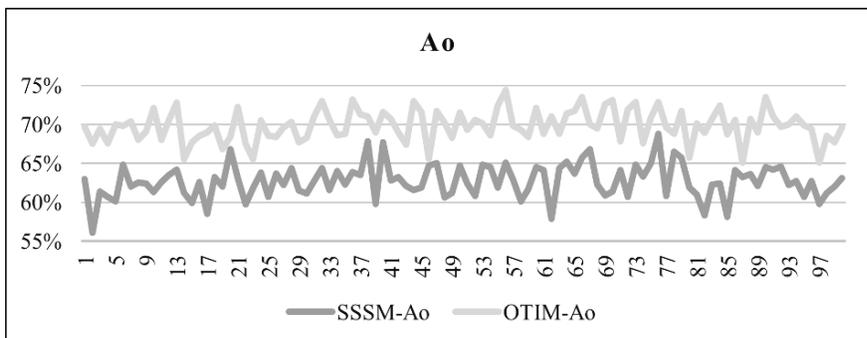
O resultado da simulação de cenários para os testes busca verificar a possibilidade de execução do planejamento obtido nas etapas anteriores, ou se é possível atingir a disponibilidade operacional máxima de maneira a atender a demanda de esforço aéreo.

Indicadores de pronta resposta

Notável nas Figura 5 e, o novo método foi superior em todos os cenários, tanto em disponibilidade como na confiabilidade da programação. Por exemplo, a disponibilidade média da frota para o método convencional de planejamento da manutenção (MCPM) foi de 62,72% contra 69,83 % para o novo método, sendo significativamente diferente um do outro, como se observa no gráfico tipo boxplot da Figura 7.

Como esperado, a disponibilidade ótima resultante da primeira etapa de otimização não foi alcançada em nenhuma das simulações. Das cem simulações, a Ao máxima alcançada foi de 74,4% contra 82,50% na primeira etapa para o novo modelo (máxima possível). Para o SSSM, a maior disponibilidade alcançada foi de 68,8%, contra 81,37% do cálculo inicial (máxima possível).

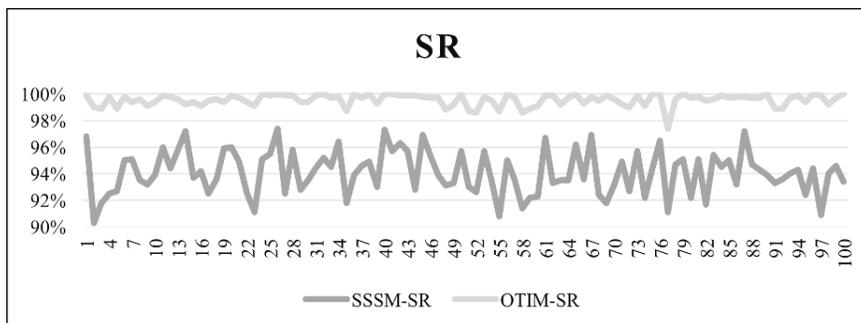
Figura 5: Comparação da disponibilidade entre o modelo convencional (SSSM) e o novo modelo – simulado



Fonte: Rebouças e Abrahão (2024).

Da mesma forma, o Schedule Reliability (SR) médio aumentou de 94,1 % para 99,55 % (SSSM e o novo método). Para fins ilustrativos, a Australian Aerospace incluiu uma classificação de SR de 97,5% como critério crítico para seleção e aquisição de helicópteros multipropósitos (*Australian National Audit Office*, 2014).

Figura 6: Comparação de confiabilidade da programação entre o modelo convencional (SSSM) e o novo modelo – simulado



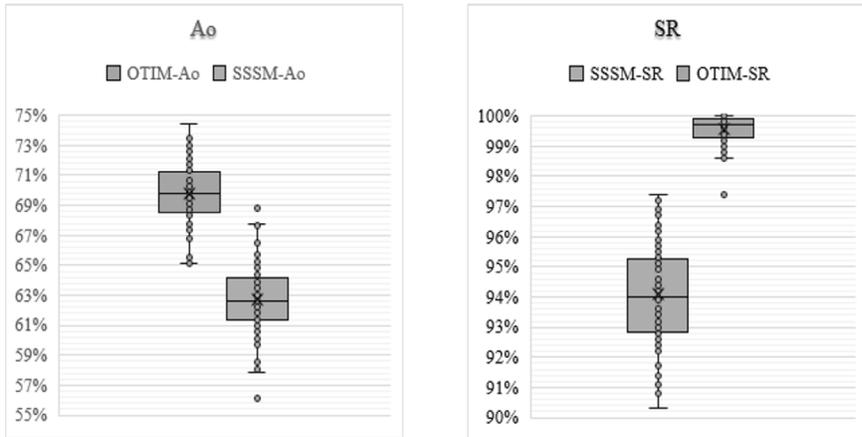
Fonte: Rebouças e Abrahão (2024).

Nesse caso o planejamento convencional apontaria para um indeferimento do projeto, enquanto o resultado por meio do planejamento otimizado aprovaria este requisito de aquisição.

Fica claro, portanto, a importância da abordagem de gerenciamento da manutenção de frota de aeronaves de defesa baseada em modelo de otimização de duas etapas no processo de aquisição de aeronaves. O teste t realizado para comparar os valores médios dos resultados obtidos para a disponibilidade operacional mostrou um valor p de $1,319 \times 10^{-50}$, indicando que a hipótese nula de que as médias são iguais é rejeitada. Portanto, houve uma diferença estatisticamente significativa entre os resultados.

Do mesmo modo, para SR, foi obtido um valor p de $8,27 \times 10^{-61}$. Portanto, a hipótese nula de que as médias são iguais é rejeitada. Ambos para um nível de confiança de 95%.

Figura 7: Boxplot para comparação de disponibilidade (Ao) e confiabilidade de programação (SR) entre o modelo convencional (SSSM) e o novo modelo – simulado

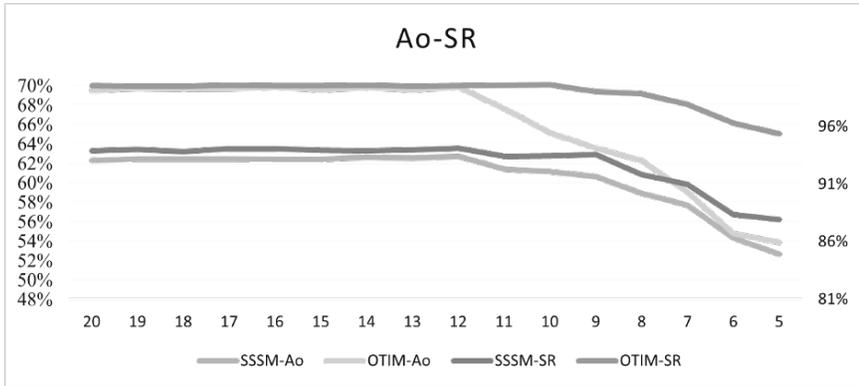


Fonte: Rebouças e Abrahão (2024).

Além da redução do downtime por manutenção preventiva, observa-se o impacto das filas na indisponibilidade da frota. A diferença entre os resultados do SSSM e do novo modelo reside na ocorrência de filas de manutenção são expressivos, chegando próximo aos 50% de redução.

Na Figura 8, vemos em destaque os indicadores de Ao e SR. No eixo x está representada a dimensão da frota, de vinte a cinco aeronaves. No eixo y, à esquerda, estão os valores de Ao, enquanto à direita, os de SR. As linhas contínuas representam a Ao enquanto as pontilhadas a SR. Os resultados otimizados estão indicados com a abreviatura "OTIM".

Figura 8: Disponibilidade e confiabilidade da programação das frotas com diferentes dimensões



Fonte: Rebouças e Abrahão (2024).

Observa-se uma estabilidade na diferença na Ao de aproximadamente sete pontos percentuais em favor do modelo otimizado. Quando se reduz a frota para menos de onze aeronaves, inicia uma queda mais acentuada, bem como a aproximação dos indicadores.

A redução da diferença se justifica, visto que quanto maior o esforço aéreo relativo, mais a distribuição de horas individuais se aproxima da equidade, ou seja, da distribuição uniforme das horas.

Apesar da queda na disponibilidade a partir de doze aeronaves ser mais acentuada no modelo otimizado, a queda da SR é mais suave, atingindo um mínimo de 95,37% com cinco aeronaves e diferença de 3,8 pontos percentuais em relação ao máximo de 99,56% com vinte aeronaves.

Já no SSSM, a queda da SR acompanha a Ao de forma mais aproximada, atingindo 87,9% com cinco aeronaves, 6 pontos percentuais em relação ao máximo de 93,9% com vinte aeronaves. Tal situação evidencia que o modelo otimizado é mais robusto em relação à capacidade de cumprimento da missão (SR).

Para efeito de ilustração da aplicabilidade prática do modelo no dimensionamento da frota, retomando o critério crítico de 97,5% de SR, qualquer frota superior a sete aeronaves conseguiria cumprir o requisito imposto pela Australian Aerospace em seu uso ótimo. Este critério não seria atingido em nenhum cenário se o planejamento fosse realizado pelo método convencional.

Conclusão

A literatura trata o problema do planejamento da manutenção de aeronaves principalmente por meio do uso de métodos de otimização, buscando minimizar ou maximizar diferentes indicadores e métricas, de acordo com as especificidades do cenário apresentado em um horizonte temporal de curto a médio prazo. Restringe-se ao nível de manutenção preventiva, não sendo usual a inclusão da manutenção corretiva nos modelos, menos ainda tratá-la de forma individualizada entre as aeronaves da frota.

Notou-se, ainda, que a limitação do horizonte temporal inferior ao período de O&S pode gerar impactos negativos além da capacidade de recuperação da organização ou empresa, como a parada total da frota por filas ou falta de material no período imediatamente posterior ao analisado.

Abordagem do problema

Foi apresentada uma abordagem inovadora para o gerenciamento da manutenção de frota de aeronaves de defesa baseada em modelo de otimização de duas etapas. Utilizou-se um método exato de otimização para a geração do planejamento estratégico e um método estocástico para os planejamentos de médio e curto prazos. As principais inovações foram a abordagem holística da

frota em todo o seu período de O&S e a inserção dos efeitos da manutenção corretiva no modelo, incluindo o tratamento individualizado por matrículas dos indicadores de MTBUMA e MTTR. Tal abordagem estabeleceu referências de soluções globais ótimas para incrementar a capacidade de pronta-resposta, ajustando a programação da manutenção preventiva e a utilização da frota por meio da minimização do downtime.

Descobertas

Os resultados foram avaliados por meio de simulação, comparando o método clássico e o novo modelo, à luz dos indicadores de disponibilidade operacional e confiabilidade da programação.

Os resultados apresentados demonstraram, além da melhoria dos indicadores de disponibilidade e confiabilidade da programação, que a não inclusão desses fatores no modelo podem gerar distorções significativas nas métricas e indicadores.

Demonstrou-se, ainda, a importância de buscar tratar as características de manutenção da frota de forma individualizada, visto que podem existir aeronaves, que por motivos diversos, sejam significativamente diferentes entre si no que tange à confiabilidade, mesmo quando se trata de uma frota homogênea (aeronaves do mesmo tipo, modelo e versão).

A distribuição heterogênea de esforço aéreo contribui para o processo de aprendizagem do sistema em uso, visto que as aeronaves a serem mais voadas poderão antecipar problemas futuros para o restante da frota. Facilita, ainda, o processo de distribuição e alocação das aeronaves para unidades, organizações, ou missões com menor ou maior demanda de esforço aéreo.

Limitações

O trabalho foi restrito à análise dos indicadores de Ao e da SR por meio da minimização do downtime acumulado da frota. Não considerou aspectos relacionados a custos nem a dimensionamento de recursos humanos, modelados apenas em alto nível, dentro da capacidade de manutenção. Ainda dentro da manutenção, as inspeções do tipo calendárica não foram inseridas no modelo.

Na dimensão operações aéreas, não foram considerados os impactos da inclusão de novas matrículas (aquisições) nem das perdas totais ou parciais de aeronaves (por acidente aeronáutico, por exemplo) no decorrer do período. A inserção destes eventos, mesmo que aleatórios, poderiam conferir maior fidelidade ao modelo.

Recomendações para trabalhos futuros

Dadas as limitações do presente estudo, várias possibilidades de melhoria podem ser levantadas, tanto no aspecto de desempenho computacional quanto de incremento da fidelidade do modelo em relação ao mundo real. O uso de outros métodos de otimização, exatos ou não exatos podem melhorar tanto o desempenho computacional quanto o resultado. Desenvolver modelos que considerem os aspectos da manutenção calendárica, de estocagem, de inclusão e perda de aeronaves ao longo do período e do uso de frotas já usadas podem gerar modelos de maior fidelidade. Incluir na modelagem os custos financeiros, demanda de recursos humanos, material de suprimento e apoio de solo, bem como dos demais elementos do SIP, vão garantir uma maior precisão dos resultados.

Referências Bibliográficas

ABRAHÃO, F. T. M. *A meta-heurística colônia de formigas para solução do problema de programação de manutenção preventiva de uma frota de veículos com múltiplas restrições: Aplicação na Força Aérea Brasileira*. [s.l.]: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006.

AEROSPACE AND DEFENCE INDUSTRIES ASSOCIATION OF EUROPE. *International specification for developing and continuously improving preventive maintenance*. Brussels, Belgium Aerospace and Defence Industries Association of Europe, Aerospace Industries Association, 2018. Disponível em: www.s4000p.org. Acesso em: 31 jan. 2019.

ALBERTO FONTE SILVA LIMA, N.; DA GRAÇA TAVARES ÁLVARES SERRÃO, P.; MARTINS ABRANTES LEITE, A. *Development of an Aircraft Health Monitoring Program for Predictive Maintenance Aerospace Engineering Examination Committee*. [s.l.]: Instituto Superior Técnico, 2017.

AUSTRALIAN NATIONAL AUDIT OFFICE. *Multi-Role Helicopter Program*. Canberra: [s.n.]. Disponível em: <http://www.itsanhonour.gov.au/>. Acesso em: 24 fev. 2022.

BLANCHARD, B. S.; BLYLER, J. E. *System Engineering Management*. 5. ed. Hoboken, NJ: John Wiley and Sons, Inc., 2016.

DANTAS, J. P. DE A.; SILVESTRE, C. A. DE M. Simulation model applied to transportation missions in the amazon region, *Aplicações Operacionais em Áreas de Defesa*, v. 21, p. 10–15, 21 jul. 2020.

DENG, Q.; SANTOS, B. F. Lookahead approximate dynamic programming for stochastic aircraft maintenance check scheduling optimization, *European Journal of Operational Research*, v. 299, n. 3, p. 814–833, 16 jun. 2022.

DENG, Q.; SANTOS, B. F.; VERHAGEN, W. J. C. A novel decision support system for optimizing aircraft maintenance check schedule and task allocation, *Decision Support Systems*, v. 146, 1 jul. 2021.

GAVRANIS, A.; KOZANIDIS, G. Mixed integer biobjective quadratic programming for maximum-value minimum-variability fleet availability of a unit of mission aircraft, *Computers and Industrial Engineering*, v. 110, p. 13–29, ago. 2017.

GRIJALVO MARTÍN, M. *et al.* New Business Models from Prescriptive Maintenance Strategies Aligned with Sustainable Development Goals, *Sustainability*, v. 13, n. 1, p. 216, 28 dez. 2020.

KOZANIDIS, G.; SKIPIS, A. Flight and Maintenance Planning of Military Aircraft for Maximum Fleet Availability, MCDM 2006, Chania, Greece; Military Operations Research. *Anais...* Chania, 2006a. Disponível em: http://papers.uth.gr/files/FMP_Kozanidis_Skipis.pdf. Acesso em: 21 maio. 2018.

KOZANIDIS, G.; SKIPIS, A. Flight and Maintenance Planning of Military Aircraft for Maximum Fleet Availability: A Biobjective Model. International Conference on Multiple Criteria Decision Making, Chania, Greece. *Anais...* Chania, 2006b. Disponível em: http://papers.uth.gr/files/FMP_Kozanidis_Skipis.pdf. Acesso em: 12 ago. 2019

KUMAR, A.; SHANKAR, R.; THAKUR, L. S. A big data driven sustainable manufacturing framework for condition-based maintenance prediction, *Journal of Computational Science*, v. 27, p. 428–439, 1 jul. 2017.

MEISSNER, R.; MEYER, H.; WICKE, K. Concept and Economic Evaluation of Prescriptive Maintenance Strategies for an Automated Condition Monitoring System, *International Journal of Prognostics and Health Management*, v. 12, n. 3, p. 1–17, 24 mar. 2021.

MEISSNER, R.; RAHN, A.; WICKE, K. Developing prescriptive maintenance strategies in the aviation industry based on a discrete-event simulation framework for post-prognostics decision making, *Reliability Engineering and System Safety*, v. 214, p. 107812, 1 out. 2021.

MILLER, R. A.; MARTIN, J. F. Airline maintenance. SAE Technical Papers. *Anais*. 1 jan. 2017. Disponível em: <http://www.iata.org/whatwedo/workgroups/Documents/MCTF/MCTF-FY2016-Report-Public.pdf>. Acesso em: 27 mar. 2018

NEMETH, T. *et al.* PriMa-X: A reference model for realizing prescriptive maintenance and assessing its maturity enhanced by machine learning, *Procedia CIRP*, v. 72, p. 1039–1044, 2018.

PAPAKOSTAS, N. *et al.* An approach to operational aircraft maintenance planning, *Decision Support Systems*, v. 48, n. 4, p. 604–612, mar. 2010.

PESCHIERA, F. *et al.* Long term planning of military aircraft flight and maintenance operations, 27 jan. 2020. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2001.09856v>. Acesso em: 8 ago. 2021

PIPPIN, B. W.; DELL, R. F.; HALWACHS, T. *Allocating flight hours to army helicopters*. [s.l.]: Naval Postgraduate School, 1998.

QIN, Y. *et al.* A two-stage optimization approach for aircraft hangar maintenance planning and staff assignment problems under MRO outsourcing mode, *Computers & Industrial Engineering*, v. 146, 1 ago. 2020b.

REBOUÇAS, S. *et al.* Structuring the resource allocation in response natural disaster phase using the Value-Focused Thinking (VFT), *Spectrum - Aplicações Operacionais Áreas de Defesa*, v. 1, p. 35–41, 2021.

REBOUÇAS, S. *et al.* Disaster Logistics: Route Optimization for Air Rescue Units, *Aplicações Operacionais em Áreas de Defesa*, v. 23, n. 1, p. 44, 31 ago. 2022.

REBOUÇAS, S.; SILVA, T. A.; ABRAHÃO, F. T. M. Modelagem de Programa de Treinamento de Pilotos para Predição de Esforço Aéreo. Simpósio de Aplicações Operacionais em área de Defesa. *Anais...* São José dos Campos: 2018.

SAFAEI, N.; BANJEVIC, D.; JARDINE, A. K. S. Multi-objective maintenance workforce scheduling in a steel company. IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline). *Anais...Elsevier*, 1 jan. 2009. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667016339337>. Acesso em: 4 ago. 2019.

SAFAEI, N.; BANJEVIC, D.; JARDINE, A. K. S. Workforce-constrained maintenance scheduling for military aircraft fleet: a case study. *Annals of Operations Research*. *Anais...Springer*, 17 jun. 2011. Disponível em: <http://eds.a.ebscohost.com/eds/pdfviewer/pdfviewer?vid=3&sid=84885fa8-1b4e-45aa-a7b4-7716385c53d3%40sdc-v-sessmgr01>. Acesso em: 7 fev. 2019.

SAFAEI, N.; JARDINE, A. K. S. Aircraft routing with generalized maintenance constraints, *Omega*, v. 80, p. 111–122, 1 out. 2018.

SGASLIK, A. *Planning German army helicopter maintenance and mission assignment*. Master's Thesis—[s.l.]: Naval Postgraduate School, 1994.

SHAHMORADI-MOGHADAM, H.; SAFAEI, N.; SADJADI, S. J. Robust Maintenance Scheduling of Aircraft Fleet: A Hybrid Simulation-Optimization Approach, *IEEE Access*, v. 9, p. 17854–17865, 2021.

SHAUKAT, S. *et al.* Aircraft line maintenance scheduling and optimisation, *Journal of Air Transport Management*, v. 89, 1 out. 2020.

SILVA, J. F. DA. *Aplicação de Algoritmo Genético e programação de metas no problema de planejamento de manutenção de aeronaves militares*. [s.l.]: Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2018.

SILVA, T. A.; REBOUÇAS, S. Modelagem de dimensionamento de esforço aéreo da instrução básica de cadetes, *Spectrum - Aplicações Operacionais Áreas de Defesa*, v. 1, 2020.

U.S. GOVERNMENT ACCOUNTABILITY OFFICE. *Weapon System Sustainment: Aircraft Mission Capable Rates Generally Did Not Meet Goals and Cost of Sustaining Selected Weapon Systems Varied Widely*. Washington, DC: [s.n.]. Disponível em: <https://www.gao.gov/assets/720/710794.pdf>.

VERHOEFF, M.; VERHAGEN, W. J. C.; CURRAN, R. Maximizing Operational Readiness in Military Aviation by Optimizing Flight and Maintenance Planning, *Transportation Research Procedia*, v. 10, p. 941–950, 2015.

WITTEMAN, M.; DENG, Q.; SANTOS, B. F. A bin packing approach to solve the aircraft maintenance task allocation problem, *European Journal of Operational Research*, v. 294, n. 1, p. 365–376, 1 out. 2021.

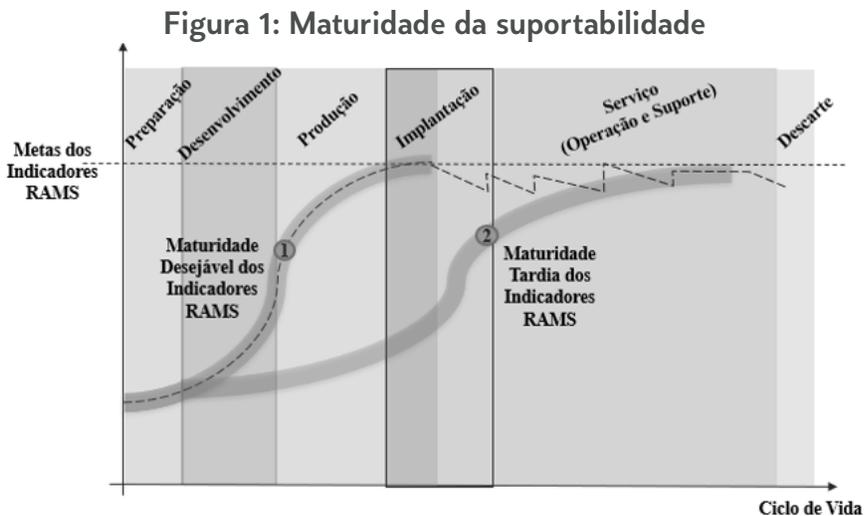
Modelo de avaliação dos impactos de fatores logísticos na suportabilidade de aeronaves de defesa

Lucas Sales Martins¹

Fernando Teixeira Mendes Abrahão²

Contextualização e definição do problema

Segundo Abrahão *et al.* (2019), a ausência de requisitos de suporte na fase de preparação de um sistema pode fazer com que a sua curva de maturidade logística escorregue à direita no decorrer do ciclo de vida, o que se evidencia por indicadores de confiabilidade, disponibilidade, manutenibilidade e segurança (do inglês Reliability, Availability, Maintainability and Safety - RAMS), como mostra a curva ② na Figura 1.



Fonte: adaptado de Abrahão *et al.* (2019).

¹ AeroLogLab-ITA (www.aerologlab.ita.br). E-mail: lucas.sales.martins@gmail.com

² abrahao@ita.br

Exemplos de sistemas com o comportamento dessa curva ② são as aeronaves norte-americanas McDonnell Douglas F-4 Phantom e Convair B-58 Hustler. De acordo com Olivier, Daniel e Magee (2011), o caça F-4 apresentou problemas de confiabilidade e manutenibilidade, resultando em baixa disponibilidade e grande quantidade de homem-hora de manutenção por hora de voo, operando parte da sua fase de serviço de forma imatura do ponto de vista de suportabilidade. Já o bombardeiro supersônico B-58, que nunca chegou a voar maduro e teve a frota retirada de serviço por conta das dificuldades, revelou problemas de engenharia, custos exorbitantes de operação e complexidades de manutenção que exigiram treinamentos excessivos, além de equipamentos altamente especializados (Russell, 2007).

Mas ainda que os requisitos apropriados de suporte sejam inseridos oportunamente no início do ciclo de vida, ineficiências relacionadas ao suporte logístico posteriormente fornecido ao sistema também podem induzir degradações nos indicadores RAMS, observadas já no período de implantação e no decorrer da fase de serviço, como ilustrado no prolongamento tracejado da curva ① na Figura 1.

Figura 2: Métricas fundamentais da suportabilidade e fatores logísticos



Fonte: Martins e Abrahão (2024).

Segundo Cruyt, Ghobbar e Curran (2014), embora pela definição acadêmica a suportabilidade não seja calculada diretamente, alguns parâmetros relacionados podem ser medidos. Assim, de modo análogo ao modelo de custo-efetividade preconizado por Blanchard (2014), que considera custos do ciclo de vida e efetividades do sistema, nesta pesquisa as métricas fundamentais da suportabilidade durante a fase de serviço são o custo de suporte e a disponibilidade operacional, ambas influenciadas por fatores logísticos provenientes das características de projeto e dos aspectos da infraestrutura geral de suporte, como ilustrado na Figura 2.

Definição do problema

A literatura de engenharia logística dispõe de alguns métodos clássicos de análise de suportabilidade, tais como: Análise de Custo do Ciclo de Vida (*Life-Cycle Cost Analysis - LCCA*); Análise de Tarefas de Manutenção (*Maintenance Task Analysis - MTA*); e Análise de Nível de Reparo (*Level-of-Repair Analysis - LORA*).

Contudo, apesar de validadas e consagradas em suas finalidades, essas técnicas não apontam um ranking de fatores quanto aos impactos que exercem na suportabilidade do sistema. Além disso, os procedimentos adotados nos setores públicos e privados diante de restrições orçamentárias, para identificar aqueles fatores que devem ser priorizados na alocação de recursos, ainda são empíricos.

No caso da aeronave A-29 Super Tucano da Força Aérea Brasileira (FAB), avião monomotor turboélice frequentemente empregado em missões de interceptação do tráfego aéreo clandestino, uma pesquisa documental e de campo apontou os seguintes parâmetros como oportunidades de melhoria para a

suportabilidade da frota, não estando definidos, entretanto, os respectivos graus de influência: (i) taxa de falhas; (ii) tempo entre manutenções preventivas; (iii) tempo de transporte de itens; (iv) atraso administrativo; e (v) tempo de reparo e revisão de itens.

Face ao exposto, o problema desta pesquisa é a carência de um modelo para classificar fatores logísticos quanto ao impacto que exercem na suportabilidade de aeronaves de defesa. Para a realidade do A-29 da FAB, em particular, este problema se reflete no desafio enfrentado pelos gestores nos processos de decisão relacionados a custo-efetividade, durante a fase de operação e suporte, sob a influência de fatores de confiabilidade e manutenibilidade.

Portanto, o objetivo geral deste trabalho é desenvolver e testar um modelo de avaliação dos impactos de fatores logísticos na suportabilidade de aeronaves de defesa, de modo que indique, sistemicamente, a prioridade para alocação de recursos em determinado contexto da vida em serviço.

Embasamento teórico e hipótese

Conforme Blanchard (2014), custo de suporte é aquele essencialmente relacionado à manutenção e ao suporte logístico do sistema, apresentando os seguintes componentes principais, em geral calculados anualmente: (a) custo de pessoal de manutenção; (b) custo de aquisição, estoque e inventário de materiais; (c) custo de ferramentas, equipamentos de suporte e de teste; (d) custo de transporte, manuseio e distribuição de materiais; (e) custo de treinamento de manutenção; (f) custo de instalações e infraestrutura de manutenção; e (g) custo de dados técnicos.

Disponibilidade Operacional

A disponibilidade operacional (do inglês *Operational Availability* - AO) leva em consideração as manutenções corretivas, preventivas e ainda os atrasos logísticos e administrativos, sendo assim calculada por Blanchard (2014) para um componente:

$$A_o = MTBM / (MTBM + MDT) \quad (1)$$

Sendo

$$MDT = \underline{M} + LDT + ADT \quad (2)$$

E

$$\underline{M} = \frac{(\lambda) \cdot \underline{M}_{CT} + (f_{pt}) \cdot \underline{M}_{PT}}{\lambda + f_{pt}} \quad (3)$$

Sendo:

- MTBM: Mean Time Between Maintenance (tempo médio entre manutenções);
- MDT: Mean Downtime (tempo médio de inatividade);
- M: Mean Active Maintenance Time (tempo médio de manutenção ativa);
- LDT: Logistic Delay Time (tempo de atraso logístico), relacionado a material; e
- ADT: Administrative Delay Time (tempo de atraso administrativo), alusivo a pessoal.

- M_{CT} : Mean Corrective Maintenance Time (tempo médio de manutenção corretiva);
- M_{PT} : Mean Preventive Maintenance Time (tempo médio de manutenção preventiva);
- λ : Taxa de Falhas, que corresponde ao inverso do tempo médio entre falhas (mean time between failures); e
- f_{pt} : Frequência de Manutenção Preventiva, que corresponde ao inverso do tempo médio entre manutenções preventivas.

Já para um sistema e no nível geral da frota, a disponibilidade operacional é calculada conforme Equações (4) e (5), respectivamente (SAE, 1992):

$$A_{O_n} = \prod_i A_{O_{ni}} \quad (4)$$

$$A_{O_{fleet}} = \frac{\sum_{n=1}^N A_{O_n}}{\sum_{n=1}^N N_n} \quad (5)$$

Suporte Integrado do Produto e Fatores Logísticos

O conceito de Suporte Integrado do Produto, do inglês *Integrated Product Support* (IPS), envolve 12 elementos básicos, os quais devem ser oportunamente considerados durante todo o ciclo de vida do sistema, para abranger todas as questões inerentes à suportabilidade, de modo a garantir que a melhor capacidade esteja disponível quando necessário e ao menor custo possível (ASD/AIA, 2021).

O Quadro 1 a seguir é inspirado no Guia SX000i (ASD/AIA, 2021), e relaciona os elementos do Suporte Integrado do Produto (IPS) com alguns fatores logísticos, dentre eles fatores de confiabilidade e manutenibilidade identificados no caso A-29 da definição do problema deste trabalho.

Quadro 1: Elementos do IPS versus Fatores Logísticos

Elementos IPS	Fatores Logísticos							
	Características de Projeto		Aspectos da Infraestrutura Geral de Suporte					
	Fatores de Confiabilidade		Fatores de Manutenibilidade			Outros Fatores		
	Taxa de Falhas	Tempo Médio entre Manutenções Preventivas	Tempo Médio de Reparos e Revisões	Tempo Médio de Transporte de Itens	Tempo Médio de Atraso Administrativo	Nível de Reparo	Qtde. de Homem-Hora	Estoque de Giro
Manutenção	X	X	X				X	
Suprimento	X	X	X	X	X	X		X
Operações Logísticas (PHS&T)				X				
Gestão de Suporte ao Produto	X	X	X	X	X	X	X	X
Dados Técnicos	X	X	X					
Suporte Cont. de Engenharia	X	X	X	X				
Recursos Computacionais			X	X	X			X
Influência do <i>Design</i>	X	X	X					
Equipamentos de Suporte			X			X	X	
Instalações e Infraestrutura			X		X	X		
Pessoal e Mão de Obra			X		X	X		
Treinamento			X		X	X	X	

Fonte: Martins e Abrahão (2024).

Método de Cálculo Prospectivo de Custos do Ciclo de Vida

Proposto por Figueiredo-Pinto e Abrahão (2018), o Método de Cálculo Prospectivo de Custos do Ciclo de Vida realiza a compilação dos custos básicos relacionados a todos os eventos singulares da provisão de suporte logístico a um sistema complexo, utilizando como ferramenta um pacote de software de otimização sistêmica de sobressalentes, simulação e cálculo de custos, denominado Suíte OPUS®, da empresa sueca Systecon Group AB.

O procedimento tem início com a modelagem computacional do cenário logístico do sistema no OPUS10©, assumindo taxas de falha constantes. Para definir o estoque otimizado que deve ser adquirido em atendimento ao nível de serviço requerido, o software segue um algoritmo baseado na técnica de multiescalão para controle de itens reparáveis, do inglês *Multi-Echelon Technique for Recoverable Item Control* (METRIC), explanada por Sherbrooke (2004). Este primeiro resultado é estático e determinístico.

Na sequência, o modelo é submetido à simulação estocástica no programa SIMLOX©, que traz dinamismo à análise através da inserção de variáveis relacionadas ao perfil operacional, para obtenção da disponibilidade média e em função do tempo.

Por último, os resultados já obtidos são carregados em um terceiro programa da suíte chamado CATLOC©, responsável pelo cálculo dos custos de todos os eventos ocorridos no período de operação simulado.

Métrica de Custo-Efetividade

Segundo Blanchard (2014), a Métrica de Custo-Efetividade de um sistema pode ser expressa em termos de sua disponibilidade e do seu custo do ciclo de vida, conforme a seguinte Equação.

$$\text{Custo-Efetividade} = \text{Disponibilidade} / \text{Custo do Ciclo de Vida} \quad (6)$$

Hipótese

A principal hipótese que norteia este trabalho afirma que a combinação do Método de Cálculo Prospectivo de Custos do Ciclo de Vida com a Métrica de Custo-Efetividade, em diferentes cenários da fase de serviço, permite avaliar impactos de fatores

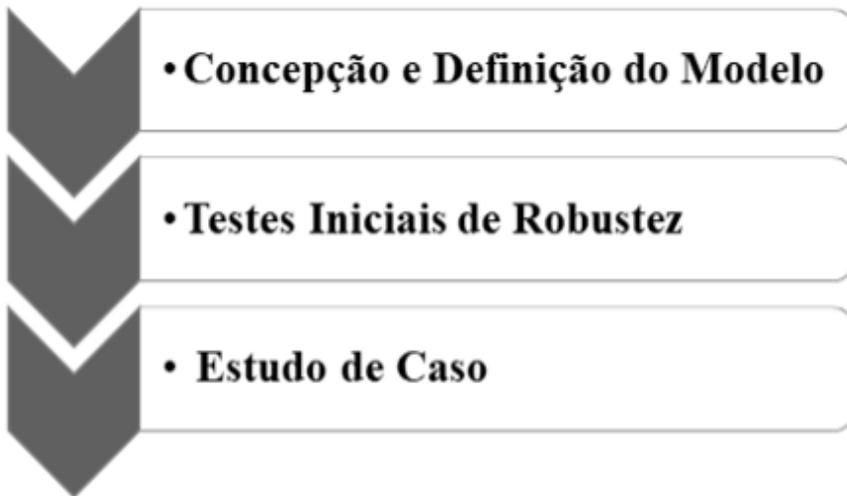
logísticos na suportabilidade de aeronaves de defesa, de modo a identificar prioridades para alocação de recursos.

Metodologia

Descrição do Método

O método utilizado para testar a hipótese formulada foi composto por três procedimentos, conforme Figura 3.

Figura 3: Procedimentos do método para testar a hipótese



Fonte: Martins e Abrahão (2024).

O primeiro procedimento foi a concepção e definição do modelo requerido, combinando o Método de Cálculo Prospectivo de Custos do Ciclo de Vida e a Métrica de Custo-Efetividade, com a finalidade de avaliar impactos de fatores de confiabilidade e manutenibilidade na suportabilidade de aeronaves de defesa, de modo a identificar prioridades para alocação de recursos.

No segundo procedimento, com a finalidade de verificar a coerência e consistência do modelo sob o aspecto quantitativo, foram executados testes iniciais de robustez no modelo.

Já no terceiro procedimento, para verificar a aplicabilidade do modelo a situações específicas em campo, realizou-se um estudo de caso inspirado no cenário real de uma frota de aeronaves de defesa, cujas linhas de ação alternativas e respectivos impactos na suportabilidade estão relacionados a variações de fatores logísticos.

Recurso Computacional

O recurso computacional empregado nas implementações foi o pacote de software Suíte OPUS©, na versão RDM (*Refined Data Model*) 2022.1 revisada de 02 de junho de 2022, composto pelos programas OPUS10© (Otimização), SIMLOX© (Simulação) e CATLOC© (Cálculo de Custos), da empresa sueca Systecon Group AB.

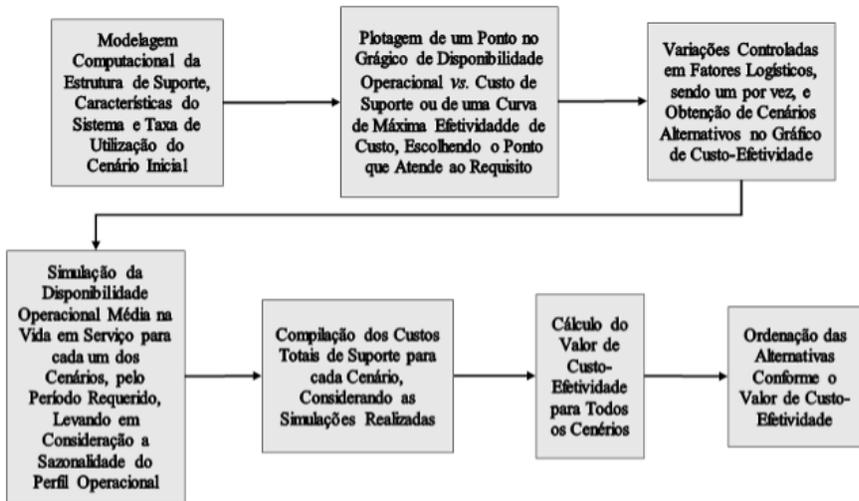
Aplicação da metodologia, apresentação dos resultados e discussão

Concepção e Definição do Modelo

A concepção e definição do modelo consistiu em esquematizar e descrever um padrão de análise comparativa entre uma condição de referência e projeções de cenários alternativos, decorrentes de variações controladas em determinados fatores logísticos, para viabilizar a elaboração de um *ranking* dos fatores analisados quanto ao impacto na suportabilidade do sistema.

A Figura 4 apresenta o esquema do modelo desenvolvido no presente estudo, formando uma sequência lógica de implementação.

Figura 4: Esquema do modelo desenvolvido



Fonte: Martins e Abrahão (2024).

O primeiro passo é a modelagem computacional do cenário inicial. Assim, o modelo deve compreender três importantes conjuntos de informações, quais sejam: Características do Sistema; Estrutura de Suporte Logístico e Informações de Operação.

O segundo passo inclui a plotagem determinística de um ponto ou de uma curva no gráfico de disponibilidade operacional versus custo de suporte, na qual todos os pontos são soluções ótimas, ou seja, com máxima efetividade de custo, bem como a escolha do ponto que atende ao requisito de disponibilidade operacional referente a um cenário inicial. A este ponto corresponde uma lista específica de itens para compor o estoque de giro, com as respectivas quantidades e locais de armazenamento.

O terceiro passo requer a indução de variações controladas em fatores logísticos, sendo um por vez, mantendo-se os demais parâmetros, para obter novos pontos de custo-efetividade com o mesmo estoque inicial ou novas curvas de máxima efetividade de

custo, que em ambos os casos representam cenários alternativos. Nesta última opção, observando-se o requisito de disponibilidade operacional.

O quarto passo é a simulação da vida em serviço para cada um dos cenários, pelo período requerido, levando em consideração a sazonalidade do perfil operacional, para obter de maneira estocástica a média de disponibilidade nesse período e a sua variação em função do tempo.

O quinto passo é a compilação dos custos totais de suporte para cada cenário no período requerido, considerando as simulações realizadas.

O sexto passo é o cálculo do valor de Custo-Efetividade para o cenário inicial e cada uma das alternativas, em termos de custo de suporte e disponibilidade operacional, conforme a Equação 7 adaptada de Blanchard (2014):

$$\text{Custo-Efetividade} = A_i / C_i \quad (7)$$

Sendo:

A_i representa a disponibilidade operacional do cenário i ; e

C_i representa o custo de suporte do cenário i .

Finalizando, o sétimo passo é a ordenação das alternativas de acordo com o valor de Custo-Efetividade obtido, para classificar os fatores logísticos em um ranking segundo o impacto que exercem na suportabilidade da frota.

Testes Iniciais de Robustez

Há cinco Operadores numerados de 1 a 5, que possuem as seguintes quantidades de aeronaves, respectivamente: 8, 7, 8, 20 e 3. A utilização da frota corresponde a uma média de 240 horas de voo (HV) por ano para cada aeronave. E a dinâmica do suporte logístico é assim descrita:

- Os Operadores podem estocar itens e são suportados por um Armazém Central e uma Oficina Contratada. O item removido da aeronave, seja por falha ou revisão, é levado até o Armazém. Esse tempo de transporte é de 3 dias e de 2 dias no sentido inverso;
- Do Armazém, a LRU recolhida é levada à Oficina. Ao término do serviço, o item é enviado de volta ao Armazém. O tempo de transporte entre essas estações é de 2 dias;
- A troca de um item na aeronave demora em média 4 horas e necessita de 2 técnicos;
- São desconsiderados os eventos de “condenação” de itens, “canibalização” de aeronaves ou suprimento lateral entre Operadores;
- Os custos de transporte entre quaisquer estações e de estocagem anual correspondem a 0,5% e 1,5% do preço de aquisição de cada LRU, respectivamente;
- O custo do Homem-hora (H.h) é de \$200 na contratada e \$100 no parque central ou nos operadores. O reparo ou revisão geral de qualquer item requer 96 H.h e um kit de peças que custa 8% do preço do item novo; e
- As inspeções programadas de aeronaves ocorrem em operadores, conforme Quadro 3.

Quadro 2: Dados dos itens das aeronaves

Item	Preço de Aquisição (\$)	Taxa de Falha (1/10HV)	Quant. por Anv	Tempo de Manut. (Dias)	Intervalo Manut. Prevent. (HV)	Quant. em Estoque
LRU01	219.652,31	1.897	2	90	-----	0
LRU02	35.694,41	1.492	4	90	-----	20
LRU03	101.271,98	1.092	1	90	-----	2
LRU04	23.515,90	1.081	1	90	-----	5
LRU05	47.538,11	703	4	90	-----	9
LRU06	37.927,15	2074	1	75	1.000	9
LRU07	12.137,07	2029	2	75	-----	14
LRU08	4.731,88	1808	1	120	-----	12
LRU09	12.298,79	1772	1	120	500	18
LRU10	210.650,00	1613	1	180	-----	0
LRU11	23.529,33	1406	4	120	1.500	35
LRU12	5.969,31	1318	2	120	4.800	17
LRU13	24.550,40	1196	2	75	-----	8
LRU14	87.341,22	886	1	120	3.000	4
LRU15	9.031,84	616	2	120	-----	8

Fonte: Martins e Abrahão (2024).

Quadro 3: Inspeções programadas das aeronaves

Periodicidade da Inspeção	H.h Inspeção (quant./evento)	Kit Inspeção (\$/evento)	Tempo de Inspeção (Dias)
12 Meses	40	12.000,00	2
350 HV	120	17.500,00	5

Fonte: Martins e Abrahão (2024).

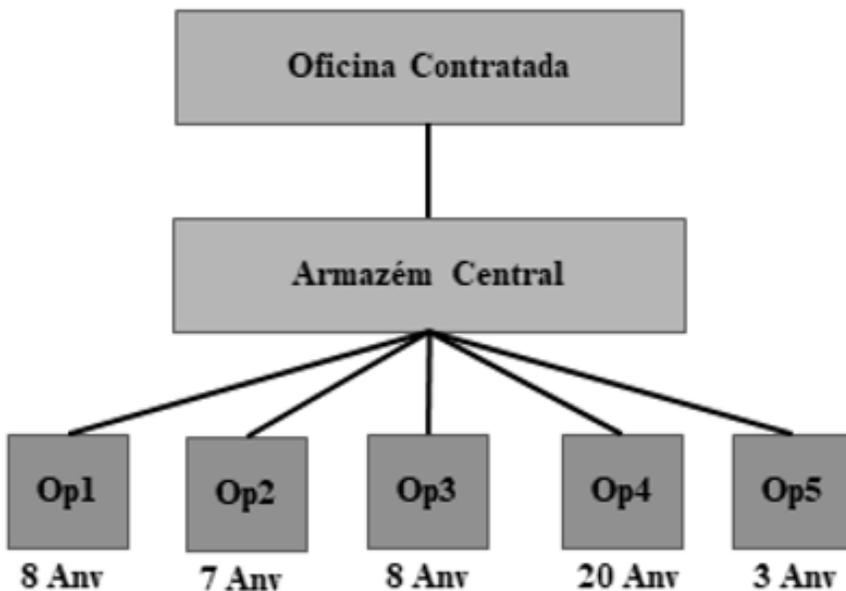
Foram identificados os seguintes fatores para serem avaliados quanto aos impactos na suportabilidade da frota: Taxa de Falha; Tempo entre Manutenções Preventivas; Tempo de

Manutenção; Tempo de Transporte de Material; Nível de Reparo (localidade de manutenção); Quantidade de Homem-hora (H.h); e Estoque de Giro.

Considerou-se então, a título de exemplo, a variação de 20% como melhoria em cada um desses fatores logísticos, sendo um por vez, no intuito verificar a consistência do modelo. Para todos os cenários analisados, foi definida uma duração de 5 anos.

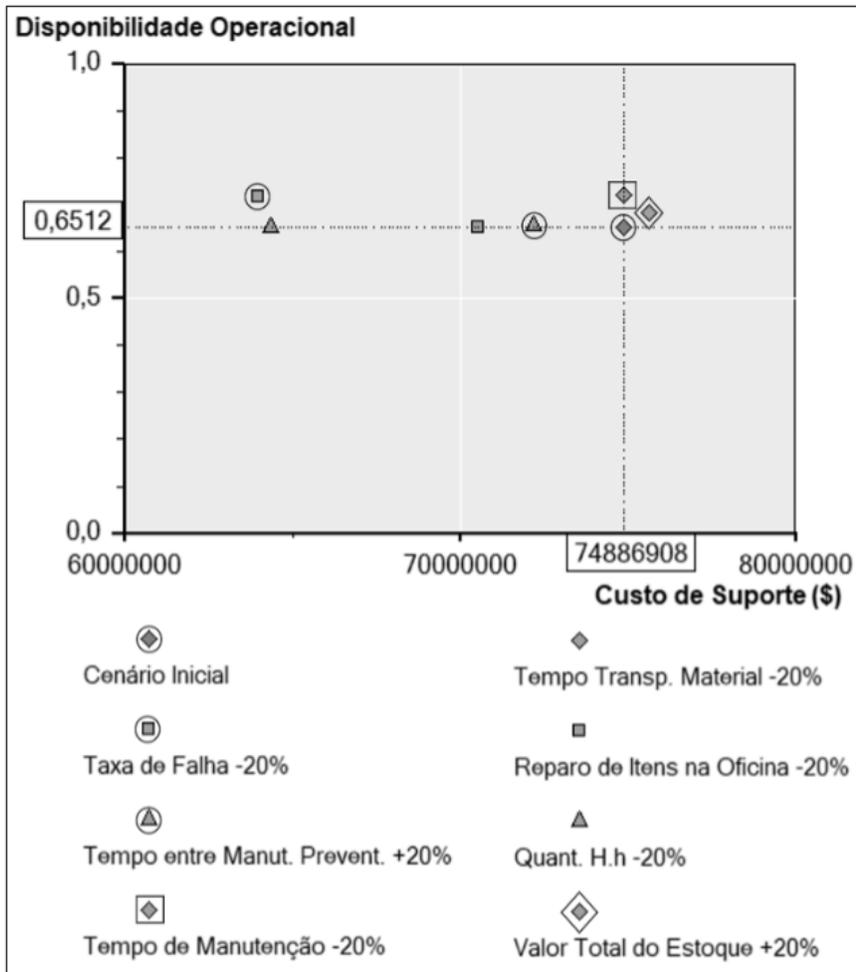
A modelagem no OPUS10© resultou no layout da Figura 5 e no gráfico de efetividade de custo da Figura 6, obtido de forma determinística, o qual destaca a disponibilidade operacional e o custo de suporte do cenário inicial da frota, bem como o comportamento dessas métricas nos cenários alternativos, caracterizados pelas respectivas variações controladas nos fatores logísticos analisados.

Figura 5: Vista da estrutura de suporte logístico



Fonte: Martins e Abrahão (2024).

Figura 6: Relação custo-efetividade dos cenários analisados no OPUS10©



Fonte: Martins e Abrahão (2024).

A sazonalidade do perfil operacional foi introduzida ilustrado na Figura 7 para todos os cenários.

Quant. Missões: 13.280

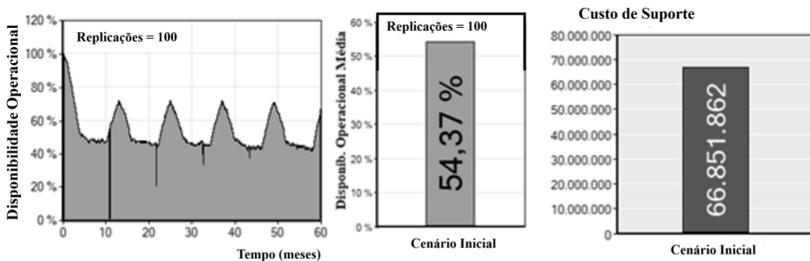
Figura 7: Perfil operacional simulado no SIMLOX©



Fonte: Martins e Abrahão (2024).

A Figura 8 mostra, como exemplo, o resultado estocástico obtido ao final de 100 replicações no SIMLOX© para o cenário inicial, cuja disponibilidade média resultou em 54,37%. Esta mesma figura apresenta também os custos de suporte incidentes no decorrer do período, compilados no CATLOC©, referente ao cenário inicial.

Figura 8: Disponibilidade no SIMLOX© e custo de suporte no CATLOC©



Fonte: Martins e Abrahão (2024).

O Quadro 4 apresenta a lista ordenada das alternativas, de acordo com o respectivo valor de Custo-Efetividade calculado.

Quadro 4: Classificação dos fatores logísticos conforme impacto na suportabilidade

Cenário/ Fator Logístico Variante	Varição	Disponib. Oper. Média (%)	Custo de Suporte (\$)	Custo- Efetividade (Disponib. Oper. / Custo de Suporte) \times (10 ^{^9})	Ranking de Impacto na Supor- tabilidade
Taxa de Falha	-20%	64,07	59.284.702,00	10,81	1°
Qtde. H.h	-20%	54,40	57.626.530,00	9,44	2°
Tempo de Manutenção	-20%	64,72	69.775.415,00	9,28	3°
Nível de Reparo	-20%	54,63	63.165.108,00	8,65	4°
Valor Total do Estoque	+20%	59,22	68.609.457,00	8,63	5°
Tempo entre Manut. Prevent.	+20%	55,33	64.421.394,00	8,59	6°
Tempo Transp. Material	-20%	54,46	66.882.664,00	8,14	7°
Cenário Inicial	-	54,37	66.851.862,00	8,13	8°

Fonte: Martins e Abrahão (2024).

Estudo de caso

O presente estudo de caso é inspirado na frota de aeronaves A-29 da FAB, mas com todos os dados descaracterizados, por serem de caráter reservado. Os dados dos Apêndices A, B e C encontram-se disponíveis online, no endereço eletrônico <https://www.aerologlab.ita.br/datafiles.html>.

Em seu cenário inicial, a frota é composta por 70 aeronaves, sendo 24 do modelo "A" (monoposto) e 46 do modelo "B" (biposto), distribuídas em cinco operadores de diferentes localidades. Os dados de distribuição e utilização das aeronaves, em horas de voo por ano (HV/Ano), estão organizados no Quadro 5.

Quadro 5: Dados de distribuição e utilização das aeronaves

Localidade	Operador	Modelo da Aeronave	Qtde. por Operador	Taxa de Utilização (HV/Ano)
BABV	1°/3° GAV	A-29A	5	385
		A-29B	8	226
BAPV	2°/3° GAV	A-29A	6	385
		A-29B	7	226
BACG	3°/3° GAV	A-29A	5	385
		A-29B	8	226
BANT	2°/5° GAV	A-29B	20	248
AFA	EDA	A-29A	8	150
		A-29B	3	283

Fonte: Martins e Abrahão (2024).

O sistema aeronave está representado por 141 itens reparáveis do tipo unidades substituíveis na linha (*Line Replaceable Units - LRU*), cujos parâmetros estão disponíveis no Apêndice A. Foram selecionados os 10 componentes da aviônica digital, 7 componentes do subsistema de motor, incluindo o próprio motor e principais acessórios, e ainda outros 124 componentes de diversos subsistemas da aeronave, escolhidos com base em uma análise ABC, seguindo o ranking dos itens mais significativos de acordo com o índice calculado pela expressão abaixo:

$$IS = FR \times QPA \times PREÇO \times TAT \quad (8)$$

Sendo:

IS = Índice de Significância;

FR = Taxa de Falha (*Failure Rate*);

QPA = Quantidade Por Aeronave;

PREÇO = Valor de aquisição do item.

TAT = *Turn-Around Time*

A dinâmica do suporte logístico é assim descrita:

- Os Operadores podem estocar itens e são suportados por um Armazém Central (PAMA) e uma Oficina Contratada;
- Somente a oficina possui capacidade de reparo ou revisão dos componentes.
- O item removido da aeronave, seja por falha ou revisão, é levado diretamente à Oficina Contratada. Após ser aprovado para retorno ao serviço, o item é enviado de volta ao Armazém Central ou diretamente aos Operadores, conforme demanda. O tempo médio desse transporte é de 7 dias, em ambos os sentidos;
- Os tempos de reparo são conhecidos e constantes, conforme Apêndice A.
- Os custos de estocagem anual correspondem a 1,5% do preço de cada componente;
- Os custos de reparo ou revisão de qualquer item na Oficina Contratada já incluem mão de obra, materiais aplicados e transporte;
- A troca de um item na aeronave demora em média 4 horas e necessita de 2 técnicos;

- O custo do Homem-hora (H.h) nos Operadores, para substituição de componentes e inspeções das aeronaves, foi estimado em um valor médio de US\$ 12,00; e
- As inspeções programadas das aeronaves ocorrem sempre nos Operadores, conforme Quadro 6.

Quadro 6: Inspeções programadas das aeronaves

Inspeção Programada	Periodicidade	H.h Inspeção (Qtde/Evento)	Kit Inspeção (\$/Evento)	Tempo de Inspeção (Dias)
Checks Tipo A	350 HV	120	28.000,00	7,5
Checks Tipo Y	12 Meses	40	9.300,00	2,5

Fonte: Martins e Abrahão (2024).

Foram levantados os seguintes fatores logísticos e respectivas variações, para avaliação quanto ao impacto na suportabilidade da frota.

- Tempo Médio de Transporte de Itens: redução de 45 dias para 7 dias no tempo médio de transporte dos itens aviônicos, mediante inclusão deste serviço específico em contrato. Os custos envolvidos nessa melhoria, conforme novo contrato de suporte logístico, estão disponíveis no Quadro 7.

Quadro 7: Custos de transporte de itens aviônicos

Item	Preço Unitário de Transporte (Frete + Seguro)
MA902B-XX	R\$ 3744,51
MB211E-XX	R\$ 890,37
4455-1000-XX	R\$ 2392,93
4456-1000-XX	R\$ 490,37
MB387B-XX	R\$ 892,80
34200802-80RB	R\$ 5512,66

42921A-00	R\$ 606,20
4458-1000-XX	R\$ 795,93
HG1140CA03	R\$ 909,17
MB062A-XX	R\$ 617,30

Fonte: Martins e Abrahão (2024).

- Tempo Médio de Atraso Administrativo e Logístico: redução do tempo médio de indisponibilidade das aeronaves durante as inspeções programadas do tipo *Check "A"*, de 17,7 para 12,8 dias corridos, que corresponde a uma redução do tempo médio de atraso administrativo e/ou logístico de 364,8 para 247,2 horas. Não houve custo diretamente relacionado, pois a melhoria foi obtida mediante implantação do modelo de gestão visual para planejamento e controle das atividades de manutenção, reduzindo desperdícios e realizando melhor aproveitamento dos recursos materiais e humanos. No presente estudo, foi incorporada, ainda, uma estimativa de projeção dessa melhoria no *Check "Y"* e na tarefa de substituição do motor, conforme disponível no Quadro 8.

Quadro 8: Gestão tradicional versus gestão visual

Atividade	Gestão Tradicional		Gestão Visual	
	Tempo Indisponível da Aeronave (Dias)	Atraso Administrativo (Horas)	Tempo Indisponível da Aeronave (Dias)	Atraso Administrativo (Horas)
Check A	17,7	364,8	12,8	247,2
Check Y	2,5	40	1	4
Troca do Motor	3	48	2	24

Fonte: Martins e Abrahão (2024).

- Taxa de Falhas e Tempo Médio entre Manutenções Preventivas: alteração nas taxas de falha de alguns

sistemas da aeronave, conforme apontado em estudo de confiabilidade do Parque Central, após atualização do Programa de Manutenção do A-29 pelo fabricante, que aumentou o intervalo das inspeções programadas *Check "A"* de 300 para 350 horas de voo, sem custo para a FAB. No presente trabalho, considerou-se que todos os componentes reparáveis de um sistema da aeronave sofrem o mesmo aumento ou a mesma redução proporcional na sua taxa de falha, ou seja, todos os reparáveis de um sistema da aeronave variam a taxa de falha igualmente. Os itens afetados e as respectivas taxas de falha já alteradas encontram-se listados no Apêndice B.

- Tempo Médio de Reparo e Revisão de Itens: redução dos tempos médios de reparo e revisão de alguns itens dos diversos sistemas da aeronave, de modo a atender ao TAT máximo contratual, conforme disponível no Apêndice B. Não houve custo direto, pois já existe previsão contratual para esta melhoria e penalidades associadas ao não cumprimento das metas de desempenho pela contratada.

As premissas assumidas neste estudo de caso são listadas a seguir.

- O requisito adotado para a disponibilidade operacional é de 65%, atual meta vigente para a frota de aeronaves A-29 na FAB.
- O modelo deste estudo de caso considera um escopo representativo da aeronave, composto somente por equipamentos reparáveis.
- No modelo deste estudo de caso não são considerados itens de consumo, como, por exemplo, parafusos, porcas, arruelas, gaxetas, e rebites, em decorrência de seus custos menores quando comparados aos equipamentos reparáveis.

- Os componentes reparáveis em questão não sofrem descarte e não apresentam tempo limite de vida. Não há eventos de “condenação” de itens, “canibalização” de aeronaves ou suprimento lateral entre Operadores.
- O modelo é composto por três escalões. O primeiro escalão contém os operadores, localizados em bases aéreas, o segundo escalão corresponde ao armazém central, localizado no parque de material aeronáutico, e o terceiro escalão é formado pelas oficinas contratadas, sejam dos fabricantes originais ou por eles autorizadas.
- Todas os operadores possuem seus próprios estoques de peças de reposição, armazenados nas respectivas bases aéreas. Os estoques dos operadores nas bases aéreas são reabastecidos somente pelo armazém central.
- A política de estoque $(s-1, 1)$ é assumida para todos os equipamentos em todos os operadores, o que significa que tais itens não são agrupados para o processo de reparo e as unidades são reabastecidas de uma em uma no estoque novamente.
- As falhas são consideradas independentes. Um defeito associado a qualquer equipamento não afeta a probabilidade de falha de outro equipamento no mesmo subsistema ou em outros subsistemas da aeronave.
- Fatores ambientais, como temperatura e umidade, e fatores de infraestrutura, como, por exemplo, pistas não pavimentadas, não são motivadores de falhas.
- Definiu-se a duração de cinco anos para análise do cenário inicial e de todos os cenários alternativos quanto ao impacto na suportabilidade da frota, por se tratar do período máximo permitido para contratos de suporte logístico pela legislação

vigente no país, além de ser tipicamente praticado no mercado aeronáutico.

- Foram assumidos, ainda, os seguintes tipos de missão, frequência, duração e quantidades de aeronaves empregadas conforme Quadro 9, para construção do perfil operacional.

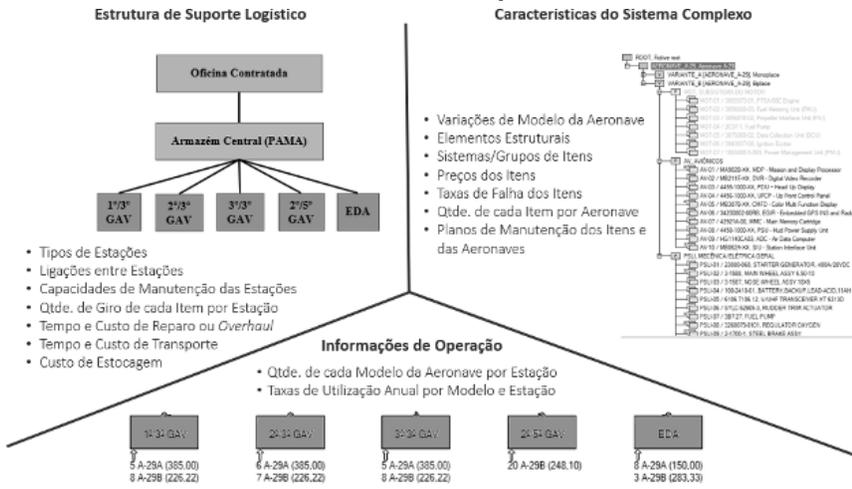
Quadro 9: Dados do perfil operacional

Operador	Tipo de Missão	Frequência	Qtde. Nominal de Aeronaves	Qtde. Mínima de Aeronaves	Duração da Missão (Horas)
1°/3° GAV	Interceptação Manhã	Diariamente	4	1	1,28
	Interceptação Tarde	Diariamente	4	1	1,28
2°/3° GAV	Interceptação Manhã	Diariamente	4	1	1,33
	Interceptação Tarde	Diariamente	4	1	1,33
3°/3° GAV	Interceptação Manhã	Diariamente	4	1	1,28
	Interceptação Tarde	Diariamente	4	1	1,28
2°/5° GAV	Instrução Manhã	2ª a 6ª Feira, da 9ª a 48ª Semana do ano	8	1	1,55
2°/5° GAV	Instrução Tarde	2ª a 6ª Feira, da 9ª a 48ª Semana do ano	8	1	1,55
EDA	Treino Demonstração	2ª a 6ª Feira, da 5ª a 48ª Semana do ano	7	1	1,33

Fonte: Martins e Abrahão (2024).

O primeiro passo resultou na modelagem ilustrada na Figura 9, que representa um arcabouço tríplice formado pela integração dos seguintes conjuntos de parâmetros: Características do Sistema; Estrutura de Suporte Logístico; e Informações de Operação.

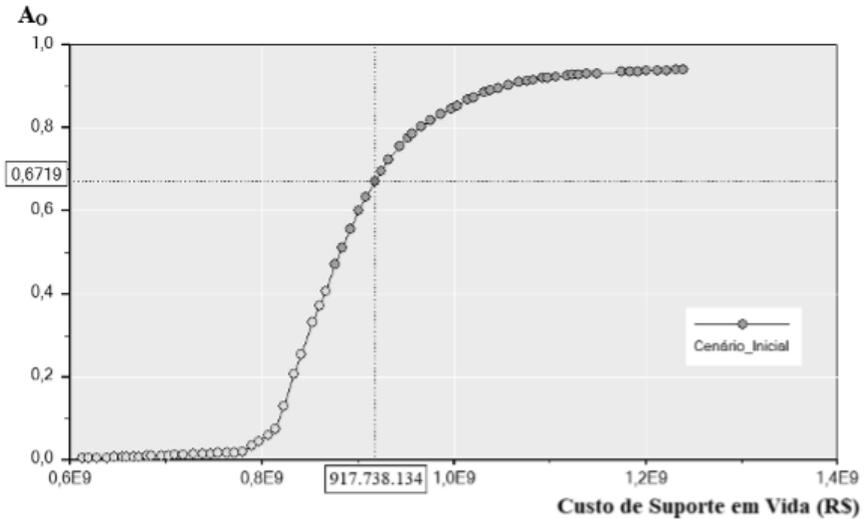
Figura 9: Modelagem do sistema, estrutura de suporte e informações de operação



Fonte: Martins e Abrahão (2024).

O segundo passo resultou na curva de custo-efetividade para o cenário inicial, conforme Figura 10, obtida de forma determinística, destacando-se o ponto que atende ao requisito inicial de disponibilidade (65%) com menor custo de suporte, o qual apresentou uma disponibilidade operacional de 67,19% e custo de suporte em vida de R\$ 917.738.134,26.

Figura 10: Curva de custo-efetividade do cenário inicial no OPUS10©

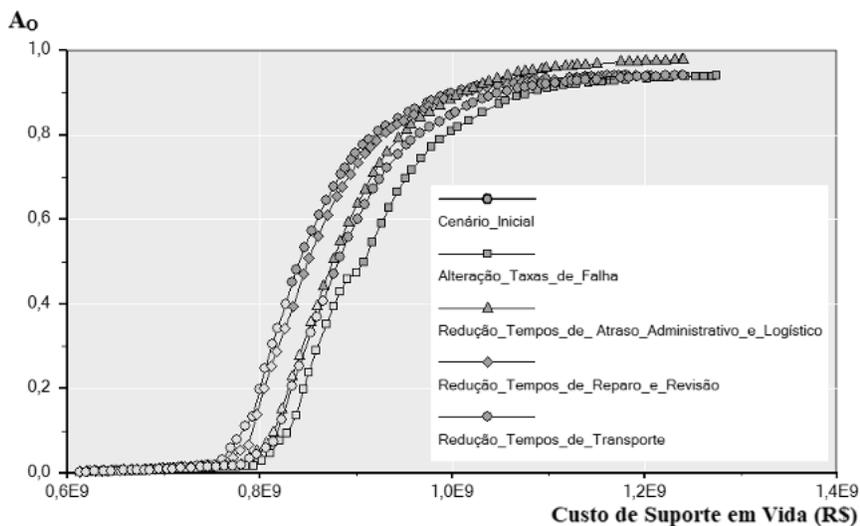


Fonte: Martins e Abrahão (2024).

A este ponto correspondeu uma lista específica de itens para compor o estoque de giro, com as respectivas quantidades e locais de armazenamento, conforme Apêndice C. Essa lista foi então considerada adquirida e incorporada ao modelo.

O terceiro passo resultou na obtenção de cenários alternativos, caracterizados pelas respectivas variações nos fatores logísticos considerados. O gráfico da Figura 11 apresenta as curvas de custo-efetividade dos quatro cenários alternativos, além do próprio cenário inicial.

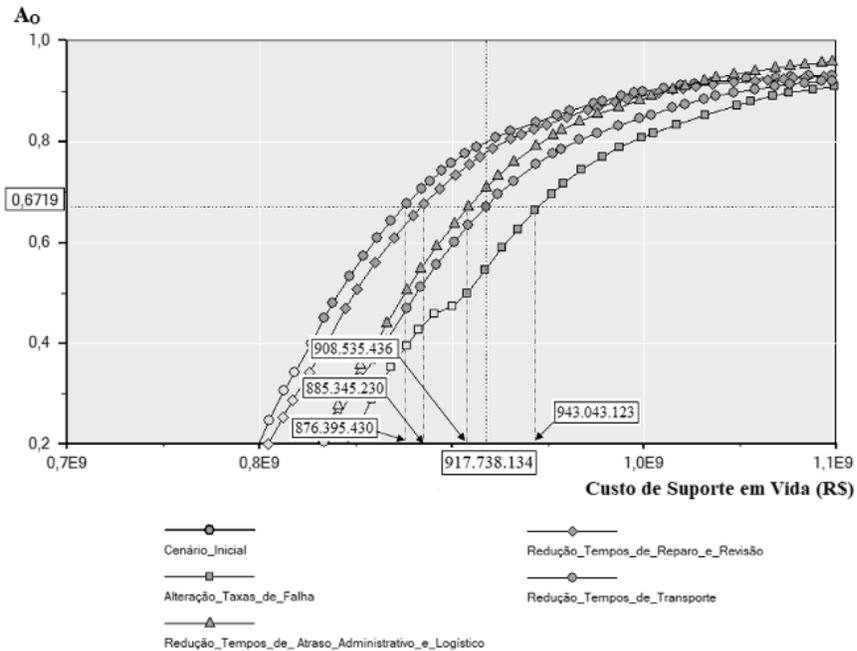
Figura 11: Curvas de custo-efetividade de todos os cenários no OPUS10©



Fonte: Martins e Abrahão (2024).

Observa-se que a curva do cenário de alteração nas taxas de falha foi a única plotada à direita da curva do cenário inicial, indicando maior custo de suporte para um determinado nível de disponibilidade. O gráfico da Figura 12 indica o custo de suporte em vida para cada cenário alternativo, tendo como referência o nível de 67,19% de disponibilidade operacional do cenário inicial.

Figura 12: Custos de suporte dos cenários alternativos e inicial no OPUS10©



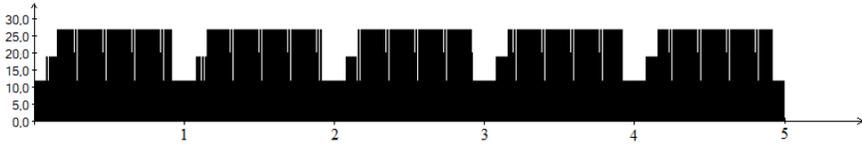
Fonte: Martins e Abrahão (2024).

No quarto passo, os pontos de interesse das curvas de custo-efetividade de todos os cenários modelados do OPUS10© foram carregados no SIMLOX©, juntamente com os dados do perfil operacional já descrito na Tabela 9, para o horizonte de cinco anos, com uma demanda de aeronaves conforme ilustrado na Figura 13.

- Qtde. de Missões: 14.050,0
- Horas de Missão: 18.761,5
- Horas de Voo: 91.835,0

Figura 13: Ilustração do perfil operacional construído no SIMLOX©

Qtde. de Aeronaves

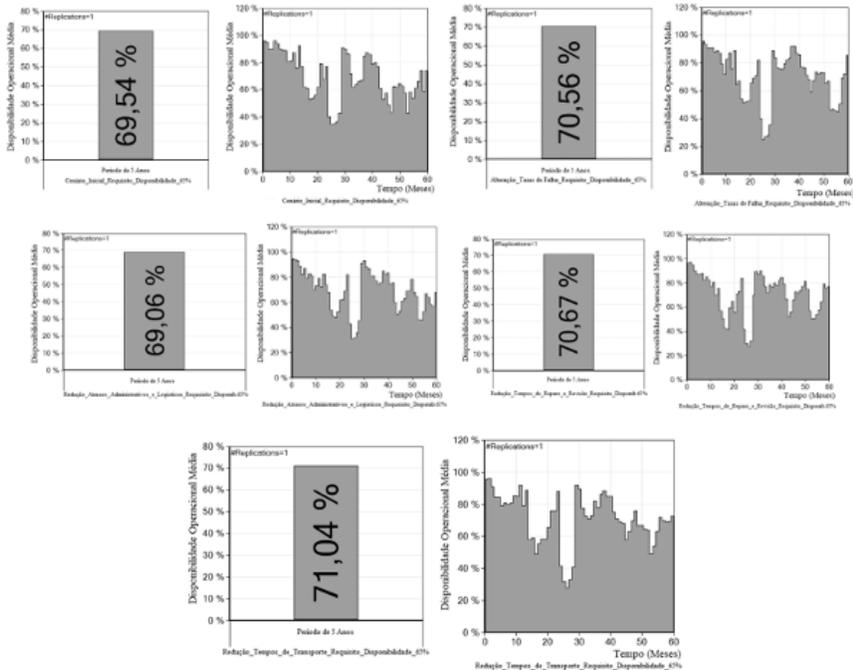


Fonte: Martins e Abrahão (2024).

Tempo (Anos)

A Figura 14 apresenta os resultados estocásticos da disponibilidade operacional média no período de cinco anos e a sua variação em função do tempo.

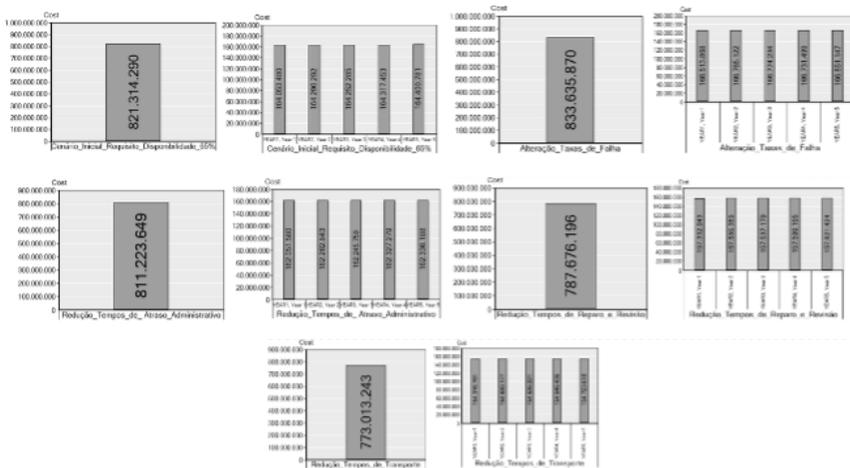
Figura 14: Disponibilidade média e em função do tempo no SIMLOX©



Fonte: Martins e Abrahão (2024).

No quinto passo, foram compilados no CATLOC® os custos de suporte incidentes no decorrer do período simulado, para o cenário inicial e todas as alternativas, como ilustrado na Figura 15.

Figura 15: Compilação dos custos de suporte no CATLOC®



Fonte: Martins e Abrahão (2024).

No sexto passo, calculou-se o valor de Custo-Efetividade para o cenário inicial e para cada uma das alternativas, levando-se em consideração as métricas de custo de suporte e disponibilidade operacional, conforme Equação 7.

Finalmente, chegando ao sétimo passo, o Quadro 10 apresenta a lista ordenada das alternativas de acordo com o valor de Custo-Efetividade calculado, classificando assim os fatores logísticos e suas respectivas variações em um ranking de impacto na suportabilidade.

Quadro 10: Custo-efetividade dos cenários e classificação dos fatores logísticos

	Descrição da Variação	Disponib. Oper. Média (%)	Custo de Suporte no Período (R\$)	Custo - Efetividade (Disponib. Oper. / Custo de Suporte) x(10 ^{^9})	Ranking de Impacto na Suportabilidade
Alternativa IV (Tempo Médio de Transporte de Itens)	Redução de 45 dias para 7 dias no tempo médio de transporte dos itens aviônicos	71,04	773.013.243,00	91,9	1°
Alternativa III (Tempo Médio de Reparo e Revisão de Itens)	Redução dos tempos médios de reparo e revisão de itens PSLI, motor e acessórios, observando-se o TAT Máximo Contratual	70,67	787.676.196,00	89,7	2°
Alternativa II (Tempo Médio de Atraso Administrativo)	Redução do tempo médio de atraso administrativo e logístico nas inspeções programadas das aeronaves	69,06	811.223.649,00	85,1	3°
Cenário Inicial	Não Aplicável	69,54	821.314.290,00	84,7	4°
Alternativa I (Taxa de Falha de Itens)	Alteração nas taxas de falha de itens de alguns sistemas da aeronave, conforme apontado em estudo de confiabilidade, após atualização do Programa de Manutenção, que aumentou o intervalo das inspeções programadas Check "A" de 300 para 350 horas de voo	70,56	833.635.870,00	84,6	5°

Fonte: Martins e Abrahão (2024).

Discussão

A diversidade de componentes e seus níveis de reparo, a coexistência de diferentes tipos de aeronaves e localidades de operação, bem como a variabilidade das taxas de falha, frequências de manutenção preventiva, tempos efetivos de manutenção, preços, recursos demandados e eventuais atrasos, logísticos ou administrativos, influenciam a suportabilidade de tal maneira que implicam a construção de modelos matemáticos complexos, eventualmente intratáveis de forma manual.

Por outro lado, a atual mudança de paradigma devido ao uso crescente de ferramentas computacionais na engenharia logística, levou à busca por uma solução que já comportasse as vantagens dessas novas tecnologias, o que inspirou o uso de modelagem, otimização, simulação e compilação de custos com a Suíte Opus.

Desta forma, a concepção e definição de um modelo de avaliação representativo e objetivo, esquematizado e descrito em etapas, foi propiciada pela fundamentação teórica acerca do conceito de suportabilidade e dos fatores logísticos típicos que a influenciam, aliada à revisão de literatura realizada em busca de trabalhos precedentes na área, abordando conceitos, métodos, ferramentas e soluções relacionadas ao problema de suportabilidade.

Logo em seguida, os testes iniciais de robustez trataram do estabelecimento de uma prova de conceito, para avaliação quantitativa do modelo desenvolvido, voltada à verificação de consistência, mas com dados genéricos e fictícios. Já o estudo de caso, além manter a natureza quantitativa dos primeiros testes realizados, incorporou um caráter realístico, com dados descaracterizados de uma frota de aeronaves da FAB, para verificar a aplicabilidade em campo.

Em ambos os casos, foi possível analisar diferentes cenários quanto à degradação ou melhoria da suportabilidade em ambientes e contextos simulados da fase de serviço, a partir da variação de fatores logísticos. Assim, os experimentos mostraram que o modelo proposto representa uma abordagem do problema de suportabilidade que merece ser mais explorada, pois foi possível obter resultados típicos de uma ferramenta de auxílio à tomada de decisão quanto à alocação de recursos.

Nesse sentido, uma importante contribuição deste trabalho é a correlação entre variações de fatores logísticos, vinculados aos elementos do IPS, e a suportabilidade de um sistema complexo, em uma visão holística, mas sintetizada pela métrica de custo-efetividade, considerando custo de suporte e disponibilidade operacional.

A natureza de aplicação operacional do trabalho, apresentando a sistematização de um modelo de referência em etapas e a visualização gráfica dos impactos de fatores logísticos na suportabilidade, é aqui destacada como mais uma contribuição, devido à importância do assunto e necessidade de assessoramento a decisões de alto nível.

Desta forma, entende-se que o modelo proposto é de uso prático, uma vez que além de apresentar uma visão de processo em etapas, também possui uma abordagem baseada em dados de campo para atualização de requisitos e estratégias de suporte, oferecendo um caminho a ser seguido ou integrado aos já existentes, visando a aumentar a maturidade de suporte ao produto.

Portanto, a partir do modelo desenvolvido neste trabalho, as decisões do gerente de suporte ao produto podem ser baseadas na análise de cenários com dados reais, mediante o emprego de ferramentas computacionais de modelagem e simulação, para corrigir degradações da relação custo-efetividade durante a fase de operação e suporte.

Conclusão

Com base nos resultados dos experimentos e em decorrência da discussão, conclui-se que a hipótese formulada é verdadeira e factível, visto que a combinação do Método de Cálculo Prospectivo de Custos do Ciclo de Vida com a Métrica de Custo-Efetividade, em diferentes cenários da fase de serviço, permitiu avaliar impactos de fatores logísticos (de confiabilidade, manutenibilidade e estoque) na suportabilidade de aeronaves de defesa, de modo a identificar prioridades para alocação de recursos, tanto nos testes iniciais de robustez quanto no estudo de caso.

Desta forma, o problema de pesquisa foi solucionado e o objetivo geral do trabalho foi atingido, pois o modelo de avaliação almejado foi desenvolvido e testado, mostrando-se relevante, consistente e aplicável.

O trabalho mostrou sua contribuição acadêmica ao apresentar um modelo de assessoramento à decisão relacionado ao Suporte Continuado de Engenharia (do inglês *Sustaining Engineering*), um dos 12 elementos do IPS. Identifica-se, assim, uma aplicação operacional durante revisões da solução de suporte a uma frota de aeronaves de defesa, na medida em que o modelo proposto pode ser utilizado como ferramenta de análise quanto à alocação de recursos por gestores e gerentes logísticos.

Por fim, a título de trabalho futuro, sugere-se a incorporação de componentes descartáveis no modelo, desde que sejam significativos para o custo de suporte e a disponibilidade operacional da frota, o que pode resultar na geração de resultados mais abrangentes. Outra sugestão pertinente é a expansão da análise para horizontes de médio e longo prazo, como por exemplo 15 e 30 anos, respectivamente, a fim de observar eventuais alterações no posicionamento dos fatores logísticos, em relação ao *ranking* obtido no resultado do estudo de caso deste trabalho.

Referências bibliográficas

- ABRAHÃO, F.T.M.; Mata Filho, J.N.; Duarte, L.P.N.; Mesquita, A.C.P. Development of the AeroLogLabTOOL®. *Anais do XIX Simpósio de Pesquisa Operacional e Logística da Marinha*. Rio de Janeiro: Centro de Análises de Sistemas Navais, 2019.
- ASD - AEROSPACE AND DEFENCE INDUSTRIES ASSOCIATION OF EUROPE. *International specification for Integrated Product Support (IPS)*. SX000i Issue 3.0. ASD/AIA. Mar 2021.
- BLANCHARD, B. S. *Logistics Engineering and Management*. 6. ed. Harlow: Pearson Education Limited, 2014.
- CRUYT, L.M.; GHOBBAR, A. A.; CURRAN, R. A Value-Based Assessment Method of the Supportability for a New Aircraft Entering Into Service. In: *IEEE Transactions on Reliability*, vol. 63, no. 4, p. 817-829, Dec. 2014.
- FIGUEIREDO-PINTO, D.G.; ABRAHÃO, F.T.M.; Custo do Ciclo de Vida: Proposta de Método de Cálculo Prospectivo e Análise de Sensibilidade a Fatores de Confiabilidade e Manutenibilidade. In: *Simpósio de Aplicações Operacionais em Áreas de Defesa (SIGE)*, 2018, São José dos Campos, SP. *Anais [...]*. São José dos Campos: Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2018.
- OLIVIER L. W.; DANIEL R.; MAGEE C. L. In: *Engineering Systems: Meeting Human Needs in a Complex Technological World*. MIT Press, 2011.230p.
- RUSSEL, S. H. In: *Supply chain management: more than integrated logistics*, *Air Force Journal of Logistics*, v. 31, n. 2, p. 56-63, 2007.
- SAE. *Reliability, Maintainability and Supportability Guidebook*. 2. ed. International RMS Committee (G-11), 1992.
- SHERBROOKE, C. C. *Optimal inventory modeling of systems, multi-echelon techniques*. 2. ed. [S.l]: Kluwer Academic Pub, 2004.

Otimização da alocação de frota de aeronaves e investimento em estoque, utilizando informações logísticas individualizadas de cada aeronave

Diego Sodré de Souza¹

Fernando Teixeira Mendes Abrahão²

Considerações iniciais

O problema de gerenciamento dos desempenhos de suportabilidade tem trazido vários desafios para a indústria e academia. O desafio é grande, pois envolve conjuntos de parâmetros (variáveis) associados às características técnicas da aeronave, suas condições de operação e manutenção, e à sua estrutura de suporte logístico. Com isso, a métrica de disponibilidade operacional ganha ênfase por tratar-se de um indicador de desempenho que permite o inter-relacionamento de variáveis envolvidas no gerenciamento de suportabilidade como um todo. Por essa relação, a suportabilidade depende das características de confiabilidade e manutenibilidade em que esses fatores em conjunto contribuem para o resultado da disponibilidade.

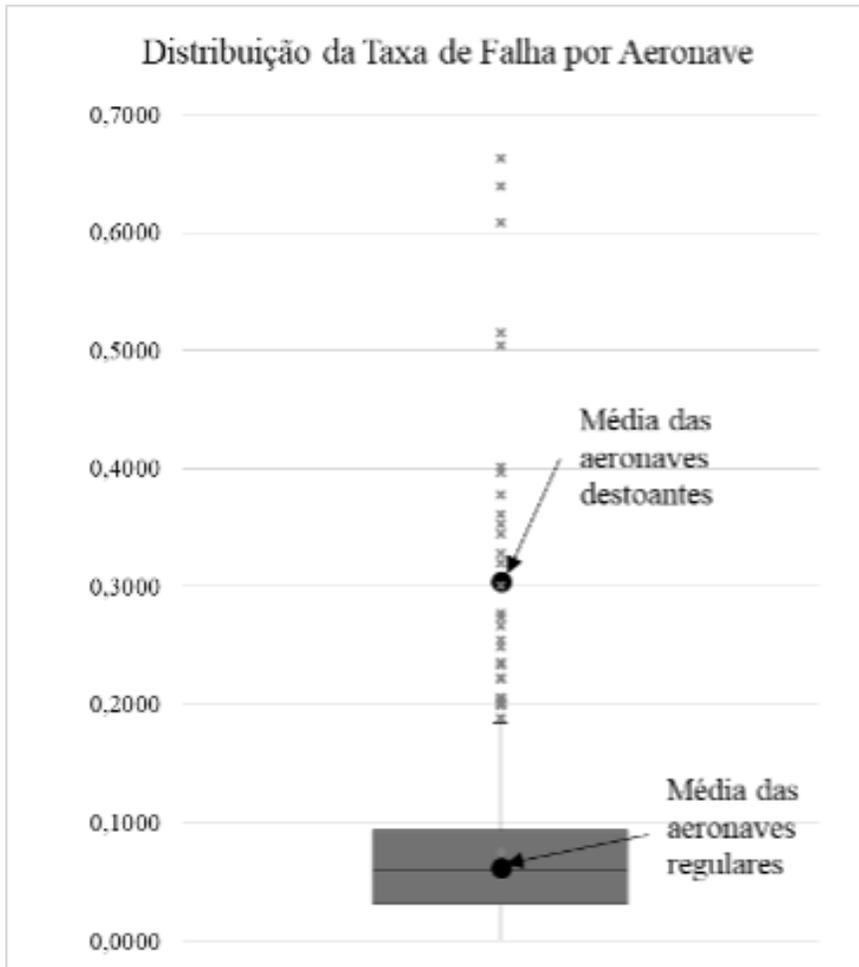
Esse trabalho apresenta uma abordagem para o problema de alocação de aeronaves à luz do desempenho individualizado em termos de confiabilidade de cada aeronave. Inicialmente, é feita a identificação de aeronaves com comportamento de confiabilidade destoante em uma frota específica. A Figura 1 mostra o diagrama de caixa relacionado à distribuição das taxas de falha de cada

¹ AeroLogLab-ITA (www.aerologlab.ita.br). E-mail: dsodres@gmail.com

² E-mail: abrahao@ita.br

aeronave. Os pontos acima do limite superior são as aeronaves com comportamentos destoantes, pois têm valores discrepantes às demais da frota.

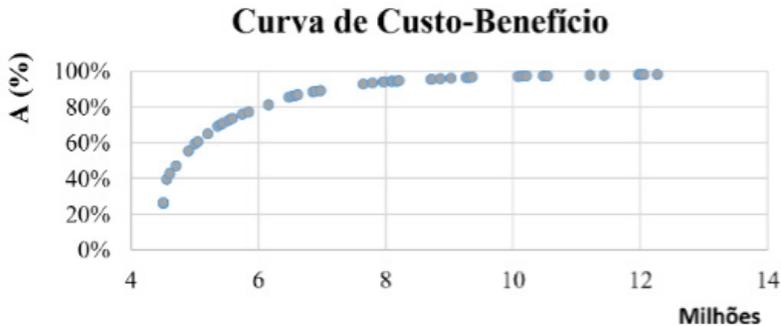
Figura 1: Resultado da taxa de falha de cada aeronave



Fonte: Souza e Abrahão (2024).

Em seguida, é estudado um modelo multiescalão que gera como resultado uma curva de custo-benefício relacionando a disponibilidade operacional e o investimento necessário para suporte à frota.

Figura 2: Curva de custo-benefício entre disponibilidade e investimento



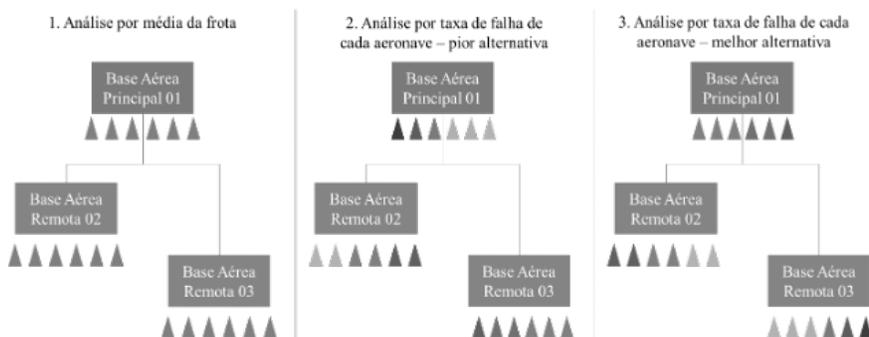
Fonte: Souza e Abrahão (2024).

A Figura 2 mostra uma curva de custo-benefício hipotética relacionando a disponibilidade (ordenada) e o investimento (abscissa). Cada ponto está associado a uma estratégia de estoque, seja para a tomada de decisão em relação à disponibilidade desejada, seja para tomada de decisão condicionada a um orçamento.

Os parâmetros são utilizados no modelo básico em sua forma tradicional com valores médios da frota. Também, propõe-se um modelo de estimativa de custos e de disponibilidade operacional em que é feita a utilização dos parâmetros individuais de cada aeronave, considerando a existência de aeronaves destoantes em diferentes instâncias e tamanhos de frota.

A Figura 3 apresenta as três abordagens sugeridas nesse trabalho, na qual a base aérea remota O3 representa a localidade mais distante da base aérea principal O1.

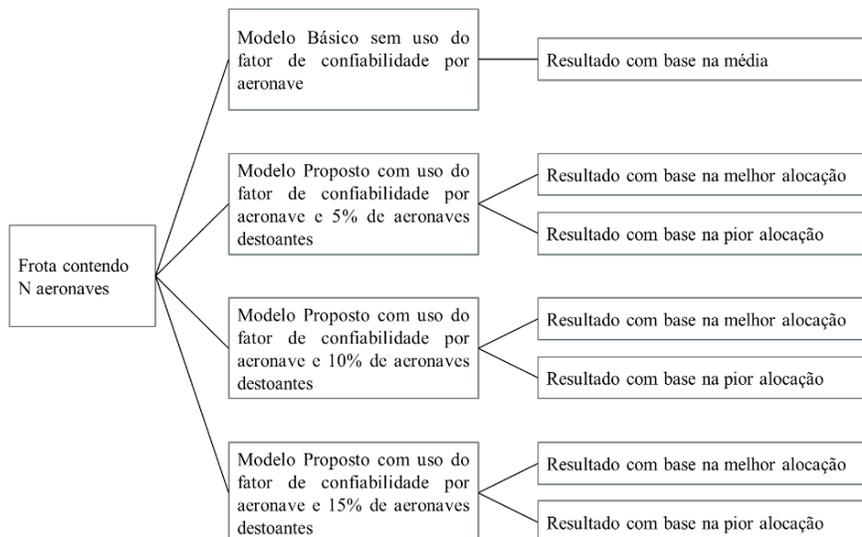
Figura 3: Representação das três abordagens propostas



Fonte: Souza e Abrahão (2024).

O modelo básico e o modelo proposto foram aplicados para cada frota e instância de aeronaves destoantes conforme ilustrado na Figura 4.

Figura 4: Aplicação das frotas nos modelos básico e proposto

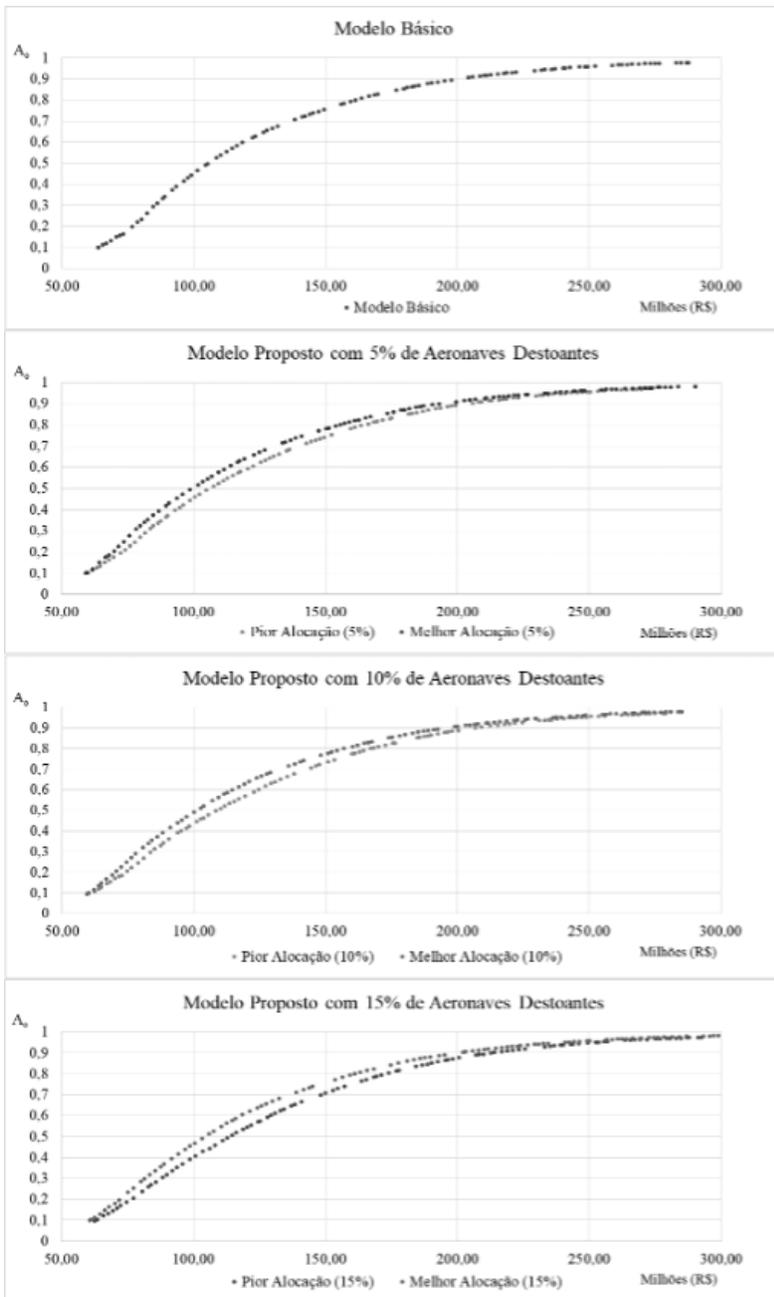


Fonte: Souza e Abrahão (2024).

Com a utilização do modelo proposto, os resultados mostraram possíveis reduções nos investimentos e possíveis ampliações dos níveis de disponibilidade operacional nas diferentes instâncias com as melhores alocações possíveis estabelecidas.

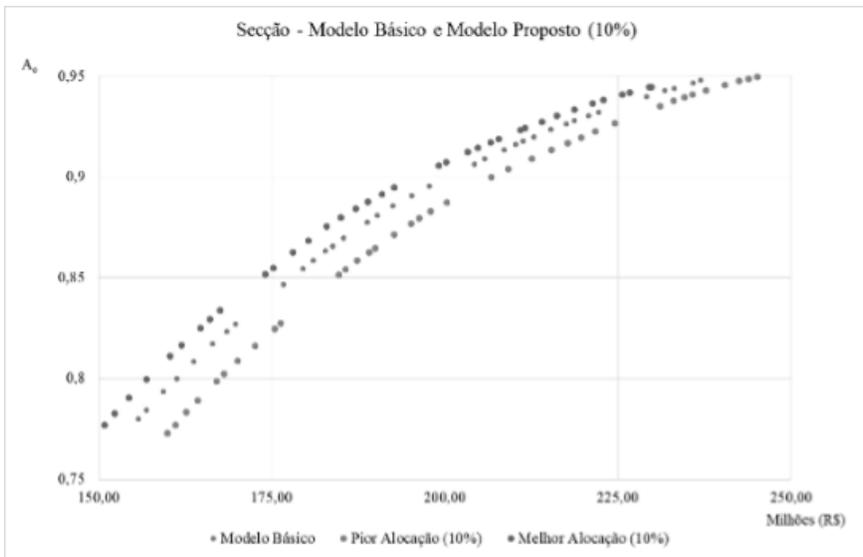
Utilizando o modelo básico e o modelo proposto, foram obtidas as curvas de custo-benefício da relação entre a disponibilidade operacional (A_o) e o investimento total em estoque conforme a Figura 5. Na Figura 6, os resultados do modelo básico por meio da abordagem considerando a média da frota formam a curva entre o resultado da melhor e da pior alocação.

Figura 5: Resultados do modelo para uma frota de 31 aeronaves



Fonte: Souza e Abrahão (2024).

Figura 6: Segmentos das curvas dos modelos básico e proposto



Fonte: Souza e Abrahão (2024).

Esse modelo, portanto, traz sua contribuição em utilizar as informações de manutenção e operação a favor das análises de suprimentos e poder apoiar as decisões dos gerentes de frota quanto à melhor alternativa de alocação da frota para ampliação da disponibilidade operacional e/ou redução dos investimentos em estoque. Além disso, é reforçada a importância em coletar e monitorar as informações de manutenção e operação geradas pelas aeronaves, pois o modelo proposto contribui sobre como elas podem ser utilizadas a favor das análises de suprimentos.

Apesar disso, o modelo proposto também apresenta limitações em relação à realidade, pois somente as peças reparáveis são tratadas. Do mesmo modo, há necessidade de ampliar as análises para o conjunto de peças descartáveis (não reparáveis) que seguem geralmente outras políticas de estoque, estando essas peças agrupadas em lotes econômicos mínimos.

Referências bibliográficas

SOUZA, Diego Sodré de. *Otimização Da Relação Entre Disponibilidade Operacional De Uma Frota De Aeronaves e Investimento Em Estoque, Utilizando Informações Logísticas Individualizadas De Cada Aeronave*. 2021. 113 f. Dissertação (Mestrado em Transporte Aéreo e Aeroportos) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2021.

Um modelo para o gerenciamento de frotas de aeronaves militares baseado na integração ótima entre manutenções preditiva e programada

Danilo Garcia Figueiredo Pinto¹

Fernando Teixeira Mendes Abrahão²

Contextualização e definição do problema

A digitalização dos componentes e processos de suporte e operações aeronáuticos, aliada aos avanços em tecnologias de sensoriamento, bem como a expansão das técnicas de análise de dados e o aprimoramento dos algoritmos de aprendizagem de máquina permitiram o surgimento de novas estratégias de manutenção na aviação, com potencial para melhorar a disponibilidade das frotas e reduzir os custos de suporte (Scott *et al.*, 2022).

A integração dos fatores acima resulta em capacidades de diagnóstico e prognóstico de saúde a partir do monitoramento contínuo de condição, as quais foram encapsuladas pelos termos IVHM (*Integrated Vehicle Health Management*) e PHM (*Prognostics and Health Management*). Esses novos conceitos juntos promovem uma mudança na estratégia de manutenção rumo a uma abordagem de planejamento mais efetiva e proativa (Fritzsch; Gupta; Lasch, 2014). Enquanto as tecnologias de IVHM proveem a capacidade diagnóstica em tempo real, PHM também atua na previsão “do estado futuro baseado em informações atualizadas” (Kim; An; Choi, 2017).

¹ AeroLogLab-ITA (www.aerologlab.ita.br). E-mail: danilodf@ita.br

² E-mail: abrahao@ita.br

Apesar dos avanços nas capacidades diagnósticas, a incerteza inerente a prognósticos representa um desafio substancial, que deve estar refletido em qualquer esforço de modelagem desse tipo de problema, especialmente quando as projeções se estendem por horizontes de tempo mais longos. O enfrentamento e a superação desse desafio são essenciais para tornar a manutenção preditiva uma realidade na aviação.

De forma geral, a defesa do sentido econômico dos investimentos, em grande parte já realizados, nas tecnologias IVHM, já presentes em várias aeronaves modernas, depende da sua habilidade em gerar efeitos positivos em pelo menos um dos fatores RAMS (*Reliability, Availability, Maintainability & Safety*) conforme apontado por Pomfret, Jennions and Dibsedale (2011) e corroborado por Sandborn (2013).

O problema que se impõe diante dessa necessidade é que a migração direta de tarefas preventivas programadas, previamente empacotadas em inspeções periódicas, para tarefas baseadas em predição pode resultar em um aumento do tempo indisponível por manutenção, o que levaria a um prejuízo para a gestão da frota como um todo.

Para entender este problema, é preciso antes compreender a dinâmica da manutenção aeronáutica. Idealmente, intervenções de manutenção só deveriam acontecer se, e quando necessário. Em outras palavras, o momento perfeito de intervir seria na iminência da falha do componente, ou exatamente no momento em que um determinado processo de falha comece a prejudicar a saúde do item, de forma a maximizar a utilização da vida útil sem, contudo, incorrer em falha (Lee; de Pater; Boekweit; Mitici, 2022). Para alcançar tal nível de tempestividade e precisão, é fundamental que se consiga realizar um acompanhamento em tempo real da evolução de parâmetros indicativos de saúde dos componentes

o que, até o surgimento das novas tecnologias em comento, não se mostrava viável como notado e explicado por Dibsedale (2020).

Em decorrência, a maioria dos itens aeronáuticos historicamente se fiou em inspeções periódicas baseadas em tempo calendárico ou tempo de operação, prática apontada por Divakaran *et al.* (2018) como um driver responsável por aumentos expressivos nos custos de manutenção. Tais eventos, não raro, incluem tarefas de substituição que requerem a remoção de componentes operacionais, muitas vezes sacrificando porções relevantes de vida útil remanescente das peças. Nesse diapasão, é importante destacar que há um ganho substancial de sinergia no empacotamento das diversas tarefas em verificações periódicas, e que a metodologia MSG-3 colaborou em grande medida para a redução do impacto causado pela manutenção programada ao restringir a sua aplicação apenas àquelas tarefas julgadas aplicáveis e efetivas.

No entanto, devido a uma série de dificuldades como imaturidade de dados e altos níveis de incerteza levando a margens de risco excessivas, tarefas de manutenção ineficazes com substituições prematuras continuaram a ser realizadas por operadores mundo afora conforme observado por Dibsedale (2020). Cabe enfatizar que o documento mestre para planejamento de manutenção, o MPD (*Maintenance Planning Document*), é inicialmente criado na fase de desenvolvimento da aeronave, quando poucos dados de operação estão disponíveis, e os padrões de falha são apenas parcialmente conhecidos. Portanto, é esperado e até desejável que a política de manutenção evolua conforme se avance na curva de aprendizagem com o desenrolar da fase de operações e suporte.

Diante do exposto até aqui, este trabalho identificou que a migração direta de tarefas previamente realizadas dentro do escopo de uma inspeção periódica para tarefas isoladas

baseadas em prognósticos pode resultar em aumento do tempo indisponível total da frota devido à perda da sinergia criada pelo empacotamento de tarefas tradicional.

Nas seções que se seguem será apresentada a hipótese de solução para o problema acima à luz da revisão da literatura no assunto, bem como o desenvolvimento do modelo concebido para a implementação da solução, sua validação por meio de simulação e, por fim, as considerações finais e recomendações.

Embasamento teórico e hipótese

A revisão da literatura conduzida indicou que trabalhos na área proposta de IVHM e PHM com aplicação em sistemas complexos, em especial aeronáuticos, são relativamente recentes, tendo os primeiros surgido há cerca de 25 anos. Além disso, foi também observada uma substancial tendência de alta na quantidade de publicações correlatas, especialmente nos últimos cinco anos que antecedem este texto, demonstrando o aumento do interesse da comunidade científica e o potencial de pesquisa oferecido pelo tema.

A seguir os aspectos essenciais encontrados na literatura e que sustentam e dão significado ao presente esforço são apresentados e discutidos com vistas à formação de uma base conceitual bem como esclarecer a lacuna de conhecimento que pretende preencher com este estudo.

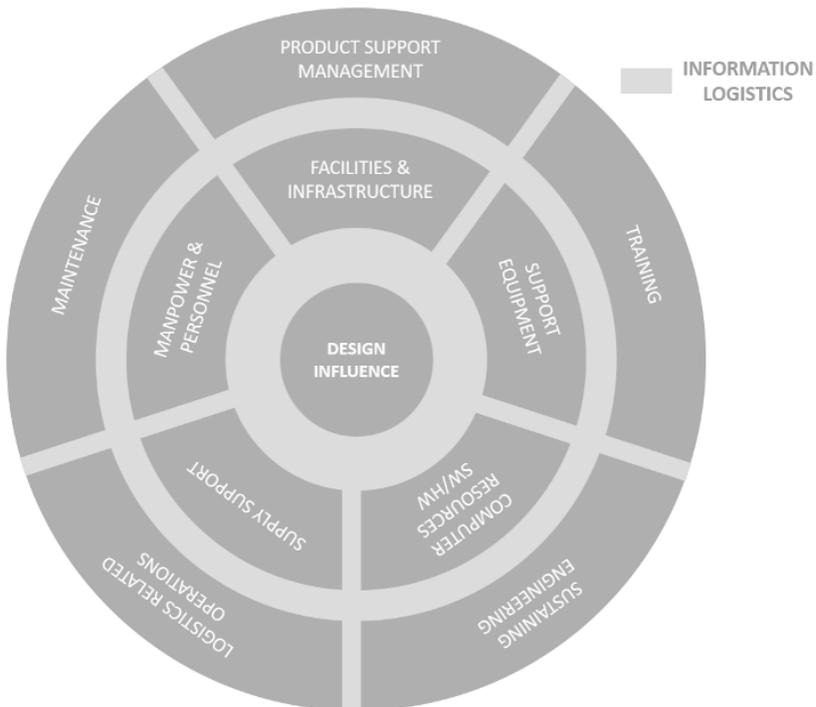
Suporte a Produto Integrado

A essência de qualquer sistema de suporte reside em sua natureza integrada com intersecções entre seus diversos elementos. O sistema assim é formado por um compêndio de

diferentes aspectos de suporte que devem ser equilibrados para funcionar de forma harmônica e coordenada para torná-lo efetivo na entrega de continuidade às operações por um custo adequado. Essa abordagem estruturada, sistêmica, única e iterativa é chamada IPS (Integrated Product Support), sendo composta por 12 elementos e respaldada por uma teoria extensamente discutida na especificação internacional publicada pela ASD/AIA (2021) e pela obra de Blanchard (2014).

A Figura 1 traz uma representação nova da organização estrutural do suporte integrado com ênfase na informação logística atuando como o elemento amalgamador que conecta os demais componentes.

Figura 1: Elementos do IPS



Fonte: Pinto e Abrahão (2024).

Nesse ínterim é importante salientar que, historicamente, a baixa qualidade dos dados coletados a partir da operação, em especial os dados de vida, foi reiteradas vezes apontada como um obstáculo impedindo o alcance de potenciais melhorias que poderiam advir do melhor entendimento do comportamento do sistema em serviço (Blanchar, 2014). Por outro lado, o surgimento das tecnologias IVHM trouxe abundância de dados de alta qualidade disponibilizados de forma precisa e tempestiva em um fluxo que permite a criação de um perfil de saúde de cada plataforma atualizado em tempo real (SAE INTERNATIONAL, 2019). Com isso, os elementos do IPS podem de fato trabalhar de forma completamente integrada de forma dinâmica, evoluindo e aprendendo a partir das operações.

Métricas de desempenho

O estabelecimento de medidas de avaliação de desempenho é requisito para o efetivo controle e verificação, de forma quantitativa e objetiva, do nível de alcance dos requisitos de suportabilidade projetados para o sistema (Blanchard, 2014). Exatamente na linha da máxima que diz que só é possível gerenciar aquilo que se consegue medir.

No setor de Defesa, essa abordagem é largamente utilizada e conhecida em aquisição de suporte como PBL (*Performance-Based Logistics*). O ponto chave desse conceito é que embora as diferentes métricas possam estar relacionadas a elementos logísticos distintos, os requisitos de desempenho devem ser estabelecidos e perseguidos de forma holística, ou seja, para o sistema como um todo. É na composição correta das diferentes medidas técnicas de desempenho (TPM na sigla em língua inglesa) que reside a garantia de um suporte efetivo.

Os diversos parâmetros de desempenho via de regra recaem sobre um dos fatores de RAMS. Dado que os parâmetros relacionados a *Safety* são significativamente rígidos, como deve ser, e que Disponibilidade (A) possui métricas que consistem em variáveis dependentes dos demais fatores, dar-se-á ênfase nos aspectos de Confiabilidade (R) e Manutenibilidade (M). Ambos estes conceitos são estocásticos, com confiabilidade focada no incremento da probabilidade de um item continuar operacional por mais tempo, enquanto as análises de manutenibilidade buscam reduzir o tempo esperado para retornar o sistema à operação. Neste trabalho, em especial, as métricas de manutenibilidade são as variáveis alvo principal da solução proposta, embora medidas de confiabilidade também representem parte importante dos cálculos.

Manutenção

Um atributo central deste estudo consiste em estudar manutenção como um coletivo integrado de intervenções corretivas, preventivas programadas e preventivas baseadas em condição ou prognóstico voltadas a manter ou restaurar as funções desempenhadas por um sistema. Isso está em linha com as recomendações dadas pela *SAE International* (2018b, p. 7) que indicam que uma solução efetiva para o gerenciamento de saúde de frota depende da implementação de uma metodologia eficiente “com o equilíbrio correto entre abordagens de manutenção programada e baseadas em diagnóstico e prognóstico”.

Concordando com essa visão, Wilmering e Ramesh (2005, p. 1) estabelecem que prognósticos são apenas “parte de uma solução integrada de gerenciamento de saúde efetivo”. Além das ações preventivas elencadas acima, o primeiro tipo de manutenção a existir, as ações corretivas ou reativas, também chamadas

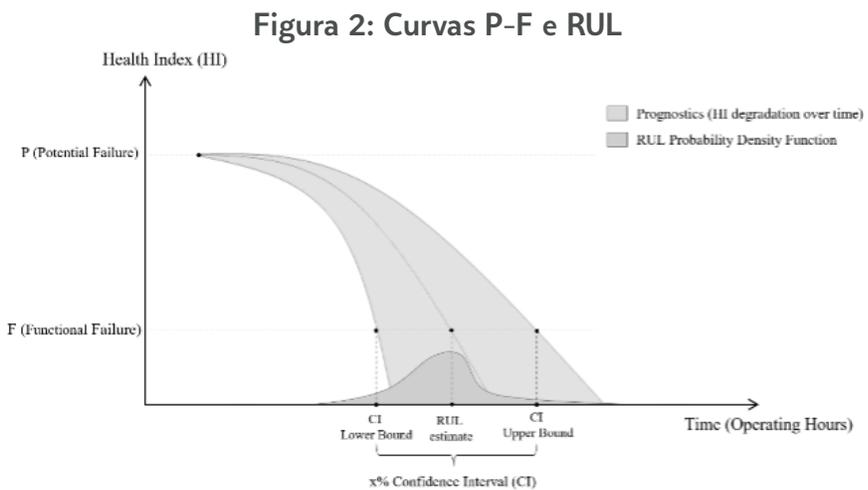
de reparos, não deve ser negligenciado já que continuam a ser demandadas por derivarem da aleatoriedade inerente do mundo físico, o que por vezes torna as ações preventivas ineficazes.

Nesse ponto, também se faz importante posicionar este trabalho em termos do seu nível de aplicação dentro do fluxo de informações de manutenção. Adotando como referência a especificação padrão chamada OSA-CBM (*Open System Architecture for Condition-Based Maintenance*), vastamente adotada pela indústria e especialmente promovida pelos princípios de projeto da norma nº 13374 (ISO, 2003) e como um modelo funcional pela *SAE International* (2018), este estudo se concentra nos níveis *Advisory Generation* (AG) e *Prognostics Assessment* (PA).

O Mecanismo da Falha

No âmbito deste texto, sempre que o termo falha é mencionado ele se refere ao estado de inoperabilidade que caracteriza um item em pane, ou seja, a perda completa de sua função esperada. Com isso em mente, as curvas P-F são um conceito fundamental na teoria de monitoramento de condição e prognóstico de falhas, razão pela qual elas são o ponto a partir do qual o processo de modelagem se inicia na próxima seção. Elas são utilizadas para estimar a Vida Útil Remanescente (RUL, na sigla em inglês) de um equipamento. Cumpre salientar que esta medida é classificada pela *SAE International* (2018) como o provável “elemento de maior valor em um programa de gerenciamento de saúde preditiva” e também como “o mais difícil de se obter”, o que é corroborado pela revisão dos modelos de previsão de RUL conduzida por Si *et al.* (2011), pela qual foi notado que a estimativa de RUL impacta o desempenho operacional e os custos de ciclo de vida de um sistema.

Os conceitos de curvas P-F e RUL estão intimamente relacionados, porque enquanto o primeiro define um curva de tendência desde a condição atual, ou o ponto em que um processo de falha é detectado (o ponto de falha potencial "P"), até o ponto estimado quando se espera que a perda da função vá ocorrer (o ponto de falha funcional "F") (Bousdekis *et al.*, 2015; Moubray, 1999), o segundo é exatamente o valor esperado da diferença no tempo entre "P" e "F" conforme ilustrado pela Figura 2.



Fonte: Pinto e Abrahão (2024).

O Papel da Incerteza

A despeito do aprimoramento na precisão das estimativas, prognósticos são essencialmente predicados em modelos estocásticos e por isso sempre contarão com um certo grau ou margem de erro embutida (Ferreiro *et al.*, 2012; Singh; Singh; Siviastava, 2016).

A componente aleatória da incerteza sempre estará presente, por isso ao invés de ser ignorada, ela deve ser avaliada e se ver refletida em toda análise envolvendo predições ou prognósticos

com o intuito de prover melhor consciência situacional ao tomador de decisão. Consequentemente, qualquer solução ou técnica desenvolvida para problemas dotados dessa característica de projeção sobre o horizonte de tempo deve ser capaz de lidar com probabilidade e incerteza. Kefalas *et al.* (2022) estão alinhados com esta afirmação e vão além denotando que a maioria dos estudos infelizmente focam apenas em estimativas pontuais em vez de também considerarem os intervalos de confiança que retratam a incerteza inerente àqueles valores esperados.

Lacuna de conhecimento e Hipótese

É importante salientar que a revisão de literatura conduzida pelo autor mostrou que esta pesquisa ataca um problema previamente não explorado por trabalhos correlatos e que o novo método desenvolvido é uma contribuição original ao conhecimento, consistindo no primeiro trabalho propondo a redução do tempo de indisponibilidade por meio da alocação dinâmica de horas de voo ou voos baseada na maximização da superposição de tarefas de manutenção programadas e preditivas.

A integração otimizada da manutenção preditiva dentro do plano de manutenção geral cumpre papel fundamental no cenário do problema que se propôs avaliar. Nesse sentido, foi identificado que uma grande parte dos estudos na área focam apenas no aumento da precisão das predições para um único componente. Outra parte significativa da literatura trabalha com monitoramento de condição para múltiplos componentes, mas restritos a um único vetor ou plataforma. Outros estudos se restringem a usar estimativas de vida útil remanescente, sem considerar os níveis de confiança associados aos resultados apresentados.

Considerando o problema apresentado, os conceitos fundamentais revistos, os mais recentes desenvolvimentos na área e as deficiências encontradas, este trabalho levantou a hipótese de que um método para integrar manutenções preditiva e programada por meio de um arcabouço dinâmico, adaptativo e único, capaz de distribuir voos ou horas de voo entre membros de uma frota minimizando o seu tempo total indisponível é uma solução efetiva para mitigar o impacto causado sobre a disponibilidade da frota pela migração de tarefas antes programadas para tarefas baseadas em condição. Em outras palavras, a hipótese é que se um método é capaz de atribuir horas, ou horas de voo, de forma ótima entre os membros de uma frota de forma a aumentar a taxa de sobreposição entre as tarefas de manutenção, permitindo assim que as mesmas possam ser executadas em conjunto, então haverá uma minimização do tempo total de indisponibilidade.

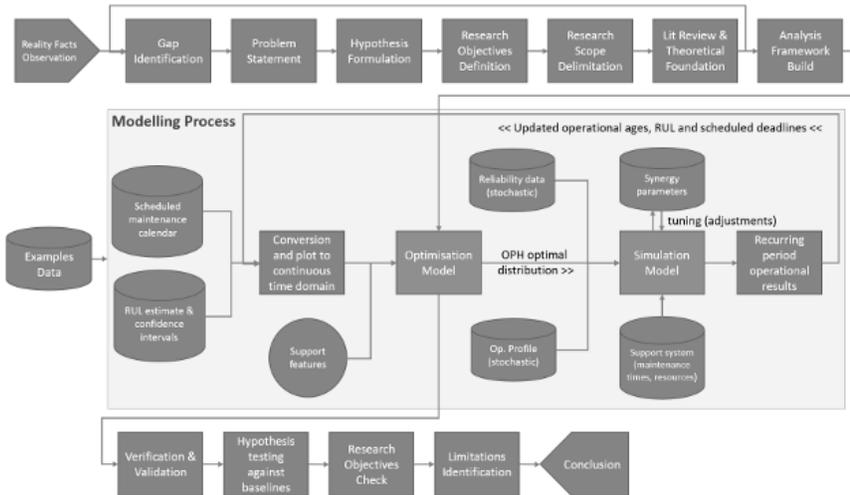
Metodologia e aplicação

A metodologia aplicada neste estudo segue uma abordagem indutiva que parte de um cenário específico e evolui na direção de generalizar a solução utilizando cenários mais complexos e incorporando variabilidade estatística, dessa forma demonstrando se a efetividade da solução é capaz de se sustentar diante de condições e parâmetros variáveis.

Em síntese, a metodologia é composta por uma díade em que a parte principal consiste em um modelo analítico que é inicialmente verificado e então expandido, seguida de uma segunda parte formada por um modelo de simulação executado em paralelo com o algoritmo de otimização a fim de incorporar estocasticidade e dependências temporais para checar a robustez dos resultados primários diante de um cenário dinâmico com condições estatisticamente variáveis. O fluxograma na Figura 3

apresenta a arquitetura de modelagem sobre a qual se baseou o processo metodológico desta pesquisa se basearam.

Figura 3: Fluxograma da arquitetura de modelagem



Fonte: Pinto e Abrahão (2024).

Desenvolvimento do modelo analítico de otimização

Em seu cerne, este trabalho propõe um modelo inovador, que integra dinamicamente as tarefas de manutenção preditiva e programada em uma estrutura única, com o objetivo de otimizar a disponibilidade da frota. Desse modo, e como forma de testar a hipótese levantada, um problema de otimização foi matematicamente formulado e então testado em condições diversas para verificar a sua efetividade e potencial de generalização. Em um segundo momento o modelo desenvolvido executado em paralelo com um modelo de simulação a fim de checar a sua robustez quando submetido a circunstâncias dependentes da variação do tempo. O modelo de simulação, dessa forma, foi utilizado para validar o modelo de otimização,

que consiste na parte central desta pesquisa, além de investigar por qual prazo a solução proposta se mantém válida diante dos efeitos potencialmente disruptivos ao planejamento trazidos por falhas aleatórias.

Para a formulação matemática da solução, inicialmente foram identificados os parâmetros e variáveis abaixo elencados como fatores cuja influência e pertinência os tornam necessários na modelagem, todos divisados a partir de apontamentos constantes nas diversas obras e modelos consultados:

- q = quantidade de aeronaves.
- n = quantidade de itens monitorados.
- AE = esforço aéreo atribuído à frota.
- uk = fator de utilização.
- L_{ij} = matriz de co-locação indicativa da localização dos components na mesma baía ou dentro do mesmo acesso.
- $s_{i,j}$ = disponibilidade de suprimento (variável booleana).
- LUL = taxa de uso máxima admitida na categoria de baixa utilização.
- OPH_k = horas operacionais atribuídas a aeronave 'k' (variável de decisão);
- $RULC$ = vida útil remanescente estimada em tempo contínuo;
- $RULC_{max}$ = limite superior da $RULC$ para um dado intervalo de confiança;
- $RULC_{min}$ = limite inferior $RULC$ para um dado intervalo de confiança;
- TSM_k = tempo até a próxima inspeção programada da aeronave 'k';

- PR = fator de prioridade atribuído pelo usuário ou modelador às superposições com inspeções programadas sobre aquelas ocorridas entre tarefas preditivas;
- FDurt = duração em horas do voo tipo "t";
- $v(t,k)$ = número de voos tipo "t" atribuídos à aeronave "k";
- V_t^{\min} = número mínimo de voos "t" que deve ser executado pela frota;
- V_t^{\max} = número máximo de voos "t" que deve ser executado pela frota;
- SDT_k = tempo indisponível devido à manutenção programada para a aeronave "k" no horizonte do cenário avaliado;
- SL = horizonte de tempo do cenário avaliado em tempo contínuo;
- PDT_k = tempo indisponível devido à manutenção preditiva para a aeronave "k" considerando superposições;
- $FRI_{i,k}$ = índice de risco de falha do componente "i" na aeronave "k", calculado para todos os componentes em que há uma tarefa preditiva se sobrepondo parcialmente a uma tarefa programada com um segmento do seu intervalo de confiança localizado antes do início da inspeção. Esse termo é dado pela expressão:

$$FRI_{i,k} = \left(\int_{RULCL_{i,k}}^{TTCL_k} pdf_{i,k}(t) dt \right) * CMDur_i, \forall k = 1, \dots, q, \forall i = 1, \dots, n$$

Sendo:

- $pdf_{i,k}(t)$ = função densidade de probabilidade da RULC para o componente "i" na aeronave "k";
- $RULCL_{i,k}$ = limite inferior na linha do tempo do intervalo de confiança vinculado à RULC para o componente "i" da aeronave "k";
- $TTCL_k$ = ponto na linha do tempo contínuo marcando o início de uma inspeção periódica para a aeronave "k";
- $CMDur_i$ = duração de uma tarefa corretiva para o componente "i";

O modelo expandido resultante é representado pela Equação 1, que consiste em uma função objetivo voltada a minimizar o tempo indisponível total em uma frota mediante a atribuição ótima de voos entre as aeronaves que compõem uma frota.

$$\min F(v_{t,k}) = \sum_{k=1}^q (SDT_k + PDT_k) + \sum_{k=1}^q \sum_{i=1}^n FRI_{i,k} \quad (1)$$

Restrito a:

$$v_t^{min} \leq \sum_{k=1}^q v_{t,k} \leq v_t^{max}, \forall t = 1, \dots, T, v_{t,k} \in N;$$

- $OPH_k \vee u_k \leq LUL, \forall k = 1, \dots, q.$
- $u_k = \frac{1}{SL} * \sum_{t=1}^T (v_{t,k} * FDur_t), \forall k = 1, \dots, q.$

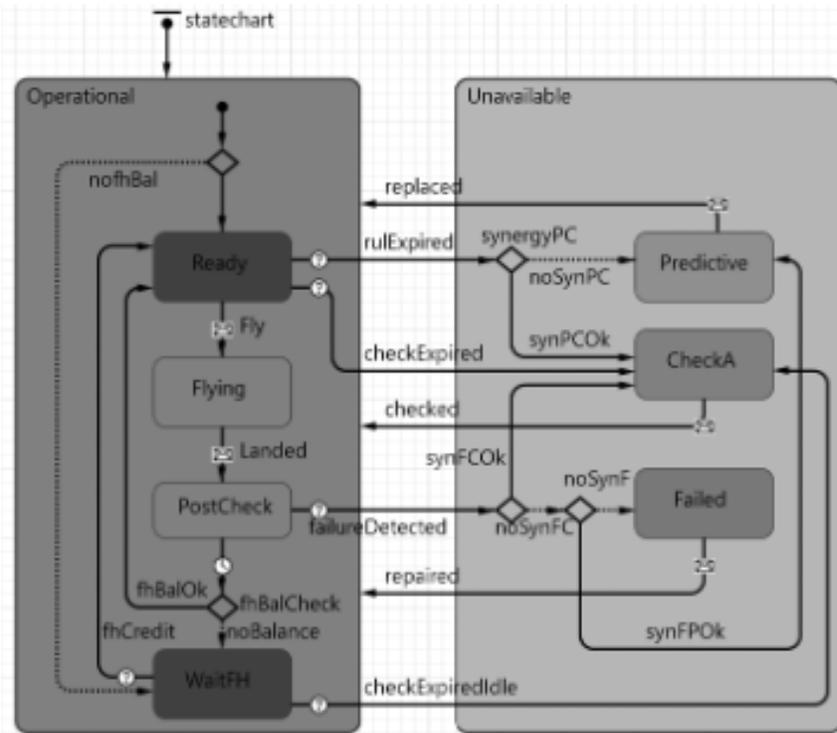
Desenvolvimento do modelo de simulação

Em sequência ao desenvolvimento e verificação do modelo de otimização, um modelo de simulação híbrida foi desenvolvido com a ajuda do *software Anylogic* ©. Foi lançado mão desse recurso como forma de validar a solução proposta por meio de análise estatística de replicações. Deve ser ressaltado que, acoplado ao correspondente teste de hipótese, esse é um método de validação razoável quando não se dispõe de dados reais disponíveis e/ou acessíveis e considerando que o processo se fia na variabilidade entre as várias instâncias de simulação.

De acordo com Borschev e Grigoryev (2021), modelos analíticos são suficientes quando o número de parâmetros é gerenciável, o comportamento do sistema é linear e há relações de dependência claras entre agentes e variáveis. Por outro lado, quando há uma quantidade substancial de parâmetros, influências não-lineares, dependências causais e temporais e comportamentos contraintuitivos, apenas a modelagem com simulação pode prover um método adequado para testar e validar a solução. Este segundo caso representa melhor a situação em análise principalmente devido às dependências causais e temporais, as quais podem ainda motivar comportamentos emergentes que podem não ter sido modelados explicitamente, mas resultam das regras projetadas subjacentes que governam a interação entre os agentes. O modelo de simulação resultante trata-se de um modelo híbrido de simulação baseada em eventos discretos (DES na sigla em inglês) e simulação baseada em agentes (ABS na sigla em inglês).

A parte ABS do modelo encontra-se representada na Figura 4, que demonstra a dinâmica interna de estados do agente aeronave, com as regras de transição entre eles, a título de exemplo.

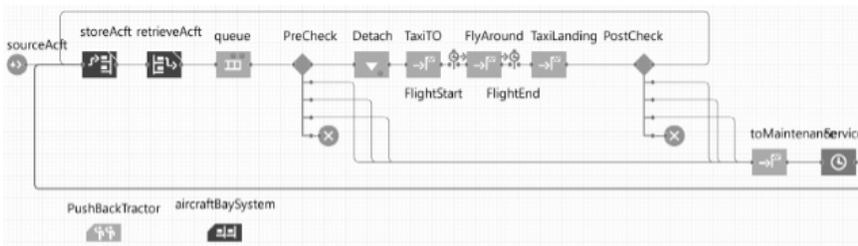
Figura 4: Dinâmica interna de estados do agente aeronave (Anylogic ©)



Fonte: Pinto e Abrahão (2024).

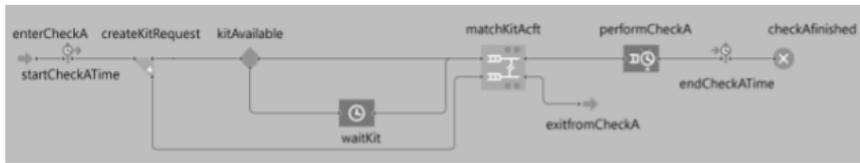
Os diversos agentes como aeronaves, mantenedores, equipamentos de apoio ao solo e hangares de manutenção interagem dentro dos processos de operações e manutenção, os quais são implementados por meio da parte DES do modelo de simulação. Alguns desses processos podem ser contemplados nas figuras a título de ilustração.

Figura 5: Rotina de voo implementada via DES (Anylogic ©)



Fonte: Pinto e Abrahão (2024).

Figura 6: Manutenção programada (Check A) implementada via DES (Anylogic ©)



Fonte: Pinto e Abrahão (2024).

O software utilizado oferece grande capacidade de integração entre os tipos de simulação, o que representa também um desafio ao processo criativo, já que são inúmeras as possíveis abordagens para a modelagem do sistema alvo. No entanto, é importante mencionar que o processo de concepção de um modelo de simulação também ajuda a promover um melhor entendimento do sistema real na medida em que quaisquer aspectos relevantes da realidade porventura negligenciado ou mal interpretado provavelmente se tornará aparente como um erro ou inconsistência durante o experimento de simulação.

Como exemplo, o ponto de parada dentro do intervalo móvel (como é chamado o segmento contendo a RULC e seu intervalo de confiança) deve ser definido explicitamente na simulação ao passo

que essa informação não se fazia necessária no modelo analítico, embora já se houvesse optado inicialmente pelo limite inferior do intervalo da tarefa mais próxima dentro de um determinado grupo por razões de segurança e mitigação do risco de falha.

Um outro aspecto cuja implementação também é limitada com a modelagem estática analítica, e que a simulação ajudou a representar e possibilitou o estudo de impacto, é o comportamento dinâmico dos intervalos móveis que tendem a se contrair à medida que a operação progride e o componente ou sistema se aproxima do ponto de falha estimado (Feather *et al.*, 2010).

Por fim, vale destacar que a simulação também permitiu a realização de análise de sensibilidade para identificação de parâmetros direcionadores de métricas de desempenho, variação paramétrica automática e análise estatística baseada em múltiplas iterações, demonstrando como a arquitetura estabelecida complementa as capacidades de ambos os modelos no desenvolvimento e aprimoramento da solução proposta.

Resultados e discussão

O modelo analítico expandido representado na Equação 1 foi submetido a um cenário dotado de complexidade suficiente para o teste considerando uma frota militar composta por 7 aeronaves, cada uma guarnecida por 17 componentes distintos dotados de monitoramento contínuo e quantidade por aeronave (QPA) igual a 1. Os dados globais de entrada do modelo estão dispostos no Quadro 1.

Quadro 1: Dados de entrada globais no modelo analítico

Parâmetro	Valor
Horizonte do cenário (horas calendárias)	2.160
Duração da inspeção programada (h. calendárias)	48
Esforço Aéreo previsto (AE)	1.200 (+/-2%)
Voos tipo 1 atribuídos à frota (FT1) – 1FH/FC	400 (+/-2%)
Voos tipo 2 atribuídos à frota (FT2) – 2FH/FC	200 (+/-2%)
Voos tipo 3 atribuídos à frota (FT3) – 4FH/FC	100 (+/-2%)
Nível de Confiança associado à RUL (CL)	0.9
Taxa de Utilização Máxima (LUL)	0.137
Fator de Prioridade 1 (PR1)	1.5
Fator de Prioridade 2 (PR2)	3.0
Duração da manutenção corretiva (h. calendárias)	12

Fonte: Pinto e Abrahão (2024).

Os dados de entrada relacionados ao agente “aeronave” podem ser observados no Quadro 2.

Quadro 2: Dados de entrada do agente aeronave

Parâmetro	Aeronave						
	1	2	3	4	5	6	7
TTCL (Cal Horas)	168	504	840	1176	1512	1848	2184
TTCU (Cal Horas)	216	552	888	1224	1560	1896	2232

Fonte: Pinto e Abrahão (2024).

Os parâmetros TTCL e TTCU delimitam os períodos em que as inspeções periódicas serão realizadas em cada aeronaves, estando devidamente defasadas e formando uma diagonal de manutenção como tradicionalmente é executado no gerenciamento de operações e suporte de frotas aéreas.

A seguir, o Quadro 3 apresenta os dados de entrada pertinentes aos componentes.

Além dos parâmetros já conhecidos como o parâmetro operacional de envelhecimento e aqueles autoexplicativos, o Quadro 3 traz também o fator de aplicação de cada componente em cada tipo de voo. Dessa forma, o componente 14, por exemplo, não é acionado nos voos tipo 2 e 3, mas opera integralmente quando a aeronave está realizando voos tipo 1.

Por fim, o modelo requer uma lista com as RUL dos componentes e os respectivos intervalos de confiança conforme exemplo no Quadro 4. Os valores são gerados de forma aleatória de modo a tornar o cenário mais realista e prover uma variação ampla o suficiente para testar o modelo.

Com base nos resultados extraídos a partir de 100 iterações utilizando simulação de Monte Carlo com geração de valores aleatório de RUL, o melhor dos modelos criados durante a pesquisa foi identificado e o histograma com a distribuição dos tempos de indisponibilidade na frota mediante a aplicação do algoritmo de otimização pode ser analisado na Figura 8.

Quadro 3: Dados de entrada dos componentes

Fator de Aplicação							
Componente	(QPA)	Parâmetro Operacional	FT1	FT2	FT3	Duração da tarefa (TDur)	Nível de estoque (s)
1	1	FH	100%	100%	100%	4	1
2	1	FH	100%	100%	100%	4	3
3	1	FH	100%	100%	100%	4	5
4	1	FH	100%	100%	100%	6	2
5	1	FH	100%	100%	100%	4	3
6	1	FH	25%	50%	100%	4	4

7	1	FH	100%	100%	100%	6	2
8	1	FH	100%	100%	100%	8	1
9	1	FH	100%	100%	100%	8	1
10	1	FH	50%	50%	50%	8	1
11	1	FC	100%	100%	100%	4	3
12	1	FC	100%	100%	100%	8	2
13	1	FC	100%	100%	100%	6	2
14	1	FH	100%	0%	0%	4	2
15	1	FH	100%	100%	100%	6	3
16	1	FH	100%	100%	100%	6	2
17	1	FH	100%	100%	100%	6	1

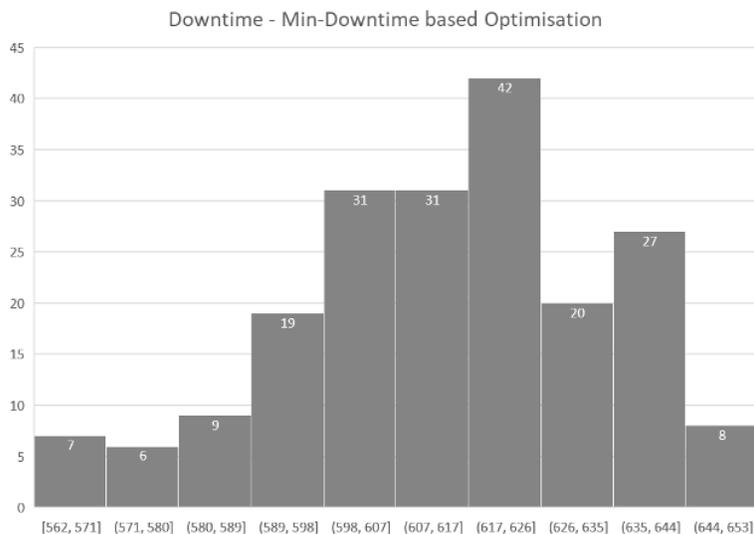
Fonte: Pinto e Abrahão (2024).

Quadro 4: Exemplo de valores de RUL

Aeronave							
Componente	1	2	3	4	5	6	7
1	72	26	85	74	64	92	110
2	25	103	33	75	2	79	30
3	14	55	82	48	101	115	73
4	56	57	96	84	37	79	56
5	113	63	86	37	44	106	107
6	107	73	26	46	78	81	21
7	103	73	38	82	40	112	41
8	8	81	41	20	104	101	41
9	106	54	61	57	98	33	86
10	76	62	42	33	99	104	68
11	31	61	96	109	38	84	106
12	72	41	15	69	90	98	102
13	36	75	33	102	85	99	81
14	109	73	28	37	47	10	115
15	43	34	41	27	78	98	25
16	33	110	119	44	35	24	75
17	41	20	88	39	46	105	11

Fonte: Pinto e Abrahão (2024).

Figura 7: Distribuição do tempo de indisponibilidade com aplicação de otimização



Fonte: Pinto e Abrahão (2024).

Além disso, o Quadro 5 traz os resultados detalhados dos valores obtidos para a taxa de sobreposição (overlay), tempo de indisponibilidade (DT) e indicador de risco de falha (FRI) oriundos da verificação realizada do modelo analítico.

Quadro 5: Resultados do modelo expandido de otimização

Resultados	Overlay	DT	FRI
Média	698.97	615.26	0.75
Variância	9635.66	378.88	0.27
Desvio-Padrão	98.16	19.46	0.52

Fonte: Pinto e Abrahão (2024).

Em comparação ao cenário base (baseline) com estratégia convencional, que efetua distribuição igualitárias dos voos de cada tipo entre as aeronaves, o desempenho do algoritmo de otimização se mostrou significativamente superior conforme demonstrado no Quadro 6.

Quadro 6: Resultado da solução otimizada comparado ao caso base

Parâmetro de Avaliação	Solução Otimizada/Baseline
Overlay	+10.56%
DT	-8.46%
DT (descontadas as inspeções)	-16.92%
FRI	-76.15%

Fonte: Pinto e Abrahão (2024).

Os dados do Quadro 6 levam à conclusão de que a maximização das taxas de sobreposição entre os intervalos móveis e as inspeções programadas de fato leva a uma redução no tempo de indisponibilidade total da frota e vice-versa. Do total de iterações voltadas à minimização da indisponibilidade, 89% das vezes houve aumento da sobreposição. Além, em 97% dos casos em que se buscou aumentar a sobreposição também resultou uma redução da indisponibilidade.

Em especial, deve ser notado que a redução de DT alcançada deve descontar a parcela fixa do tempo de indisponibilidade, qual seja as inspeções programadas, de forma que o resultado oferecido pela otimização alcançou 16.92% de redução da indisponibilidade passível de redução.

Outro resultado importante apontado na tabela diz respeito à redução do risco de falha associado às tarefas baseadas em condição. Considerando o efeito disruptivo causado por falhas, esse ganho oferecido pela solução é importante e bem-vindo, além de confirmar o objetivo de integrar de maneira harmônica as intervenções preditivas, programadas e corretivas.

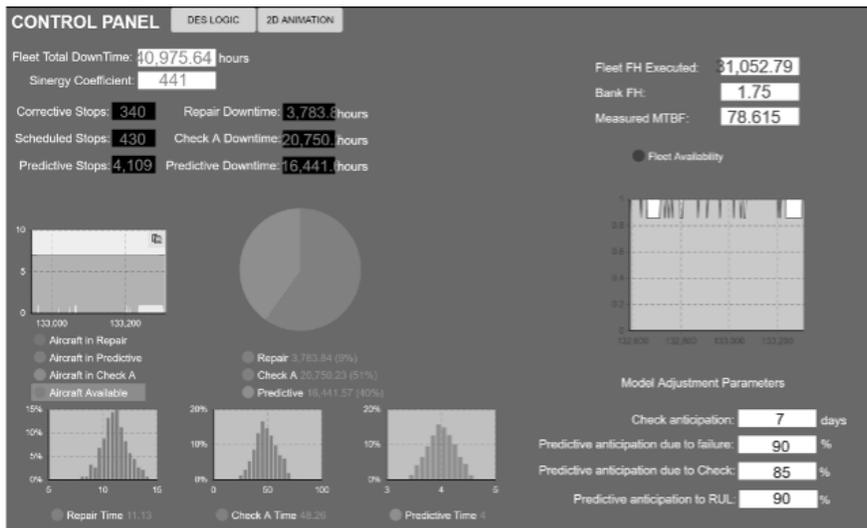
No intuito de confirmar a validade estatística dos resultados, foram ainda realizados testes de hipóteses, os quais permitem afirmar, com 1% de significância, que a média da distribuição de tempos de indisponibilidade da simulação com a operação otimizada é menor que aquela obtida utilizando a política tradicional.

Resultados do modelo de simulação

O modelo de simulação trouxe dinamismo e permitiu acompanhar a evolução de diversos parâmetros conforme pode ser observado no painel de controle exposto na Figura 8.

Para cada estratégia, tradicional e otimizada, foram realizadas 50 iterações do modelo de simulação considerando uma operação de 90 dias. Posteriormente foram realizadas novamente 50 iterações, mas neste caso o motor da simulação foi parado ao final de cada quinzena do cenário, e o algoritmo de otimização foi rodado novamente para corrigir distorções em razão da evolução do esforço executado e de eventuais interrupções ocorridas até então. Os resultados de cada configuração constam do Quadro 7 para efeito de comparação.

Figura 8: Painel de controle do modelo de simulação



Fonte: Pinto e Abrahão (2024).

Quadro 7: Comparação dos resultados do modelo de simulação

	Baseline	Simulação com solução ótima simples	Simulação com solução ótima atualizada quinzenalmente
DT Médio (Cal Hours)	729.99	679.81	648.12
DT Variância	1022.02	808.15	508.54
DT Desvio Padrão	31.97	28.43	22.55
Redução DT	-	6,87%	11.21%
Redução DT líquida	-	11,36%	18,52%

Fonte: Pinto e Abrahão (2024).

É possível observar que houve uma redução significativa do tempo de indisponibilidade, em especial quando considerada a redução líquida, excluindo a parcela irreduzível referente às paradas programadas. De fato, novamente os testes de hipóteses conduzidos comprovaram a diferença com 1% de significância. Nesse ínterim, deve ser mencionado que a redução líquida esperada pelo modelo analítico era de cerca de 22.4%. Dessa forma, é possível constatar que o momento de ocorrência das falhas pode realmente prejudicar os benefícios alcançáveis pela otimização, no entanto ainda assim, diante de um cenário consideravelmente mais desafiador, os resultados continuam razoavelmente positivos.

Por fim, um resultado importante que pode ser extraído da tabela diz respeito à melhoria obtida nos resultados a partir da adoção da atualização recorrente da distribuição de voos otimizada. Quando da aplicação da recorrência, foi possível notar uma maior redução da indisponibilidade, mais aderente à previsão do modelo analítico, e uma redução também da variância, tornando o resultado mais consistente a despeito do nível de variabilidade imposto pelo modelo de simulação.

Conclusão

Os resultados alcançados por este trabalho confirmaram a habilidade do método proposto em prover uma solução que atende aos objetivos estabelecidos inicialmente. O método cumpre o uso pretendido dos dados de IVHM/PHM de maximizar a utilização da vida útil dos componentes monitorados, ao mesmo tempo em que trata a incerteza inerente por meio do uso não só de valores esperados, mas também dos intervalos de confiança associados às variáveis aleatórias de interesse, minimizando ainda o risco de incorrer em falhas associadas a intervenções preditivas por meio do estabelecimento da ação de manutenção no início do intervalo móvel. De forma mais importante ainda, a pesquisa culminou com o desenvolvimento de um modelo que demonstrou capacidade de distribuir de forma ótima as horas de voo e os voos para minimizar efetivamente o tempo de indisponibilidade da frota com base no aumento da sobreposição entre tarefas preditivas e programadas.

Em outras palavras, os resultados obtidos demonstraram o valor da contribuição deste estudo e confirmaram o potencial esperado para ganhos de disponibilidade, tendo apresentado uma redução estatisticamente consistente do tempo de indisponibilidade para os cenários analisados, centrados em uma frota militar operando a partir de uma única base.

Ao passo que o elemento central, qual seja o modelo analítico, foi bem sucedido, o modelo de simulação trouxe robustez aos resultados entregues pela otimização. O incremento na complexidade da análise e a possibilidade de observação de fatores não capturados no modelo analítico contribuem ainda para a generalização da aplicação do método desenvolvido.

Não obstante os avanços realizados, recomendam-se para trabalhos futuros as seguintes linhas de estudo vislumbradas pelo autor:

- a incorporação de regras para evitar a parada simultânea de mais aeronaves que o hangar de manutenção pode comportar e, na mesma linha, a inclusão de limitações de recursos de toda sorte para averiguação do impacto e investigação de métodos para o correto dimensionamento dos mesmos de acordo os cenários simulados;
- a expansão do modelo analítico para contemplar operações de jatos comerciais que operam e podem sofrer manutenção em diferentes localidades, levando ainda em conta que alguns nós da malha de transporte contam com melhor infraestrutura e, portanto, são restrições que devem ser priorizadas.
- o uso de níveis de confiança distintos conforme a criticalidade do componente.

Referências bibliográficas

AEROSPACE AND DEFENCE INDUSTRIES ASSOCIATION OF EUROPE (ASD); AEROSPACE INDUSTRIES ASSOCIATION OF AMERICA (AIA). *SX000i - International specification for Integrated Product Support (IPS): S-Series IPS specifications*, Block Release 2021, 3.0, 2021, 633p.

BLANCHARD, B.S. *Logistics Engineering and Management*. 6. ed. Harlow: Pearson, 2014. 423p.

BORSHCHEV, A.; GRIGORYEV, I. *The Big Book of Simulation Modeling: Multimethod Modeling with Anylogic®* 8. Russia: Anylogic, 2021.

BOUSDEKIS, A.; MAGOUTAS, B.; APOSTOLOU, D.; MENTZAS, G. A proactive decision making framework for condition-based maintenance, *Industrial Management and Data Systems*, v.115, n. 7, p. 1225–50, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1108/IMDS-03-2015-0071>. Acesso em 25 de fevereiro de 2024.

DIBSDALE, C. E. *Aerospace Predictive Maintenance: Fundamental Concepts*. USA: SAE International, 2020. 127p.

DIVAKARAN, V.N.; SUBRAHMANYA, R.M.; RAVIKUMAR, G.V.V. *Integrated Vehicle Health Management of a Transport Aircraft Landing Gear System*. White Paper. India: Infosys, 2018. 12p.

FEATHER, M.S.; GOEBEL, K.; DAIGLE, M.J. Tackling Verification and Validation for Prognostics. In: SPACEOPS CONFERENCE. *Proceedings* [...]. 2010.

FERREIRO, S.; ARNAIZ, A.; SIERRA, B.; IRIGOIEN, I. Application of Bayesian networks in prognostics for a new Integrated Vehicle Health Management concept, *Expert Systems with Applications*, v. 39, n. 7, p. 6402-6418, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.12.027>. Acesso em 25 de fevereiro de 2024.

FRITZSCHE, R.; GUPTA, J. N. D.; LASCH, R. Optimal prognostic distance to minimize total maintenance cost: The case of the airline industry, *International Journal of Production Economics*, v. 151, p. 76–88, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2014.02.001>. Acesso em 21 de fevereiro de 2024.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *ISO Standard n° 13374: Condition Monitoring and Diagnostics of Machines*, 2003.

KEFALAS, M.; STEIN, B.; BARATCHI, M.; APOSTOLIDIS, A.; BACK, T. An End-to-End Pipeline for Uncertainty Quantification and Remaining Useful Life Estimation: An Application on Aircraft Engines. In: 7TH EUROPEAN CONFERENCE OF THE PROGNOSTICS AND HEALTH MANAGEMENT SOCIETY, *Proceedings* [...], p. 245-260, 2022.

KIM, N.; AN, D.; CHOI, J. *Prognostics and Health Management of Engineering Systems: An Introduction*. Switzerland: Springer, 2017. 347p.

LEE, J.; DE PATER, I.; BOEKWEIT, S.; MITICI, M. Remaining-Useful-Life prognostics for opportunistic grouping of maintenance of landing gear brakes for a fleet of aircraft. In: 7TH EUROPEAN CONFERENCE OF THE PROGNOSTICS AND HEALTH MANAGEMENT SOCIETY, *Proceedings* [...], p. 278-285, 2022.

MOUBRAY, J. *RCMII: Reliability-centred Maintenance*. 2. ed. Oxford: Industrial Press, 1999, 448p.

POMFRET, C.; JENNIONS, I.K.; DIBSDALE, C. The Business Value of Implementing Integrated Vehicle Health Management. In: JENNIONS, I.K. *Integrated Vehicle Health Management: Perspectives on an Emerging Field*. Warrendale: SAE International, 2011, p. 27-40.

SANDBORN, P. A. Making Business Cases for Health Management – Return on Investment. In: JENNIONS, I.K. *Integrated Vehicle Health Management: Business Case Theory and Practice*. Warrendale: SAE International, 2013, p. 7-21.

SAE INTERNATIONAL. *Aerospace Recommended Practice (ARP) 6407: IVHM Design Guidelines*. 2018.

SAE INTERNATIONAL. *Aerospace Recommended Practice (ARP) 6883: Guidelines for Writing IVHM Requirements for Aerospace Systems*, 2019. 49p.

SCOTT, M.J.; VERHAGEN, W.J.C.; BIEBER, M.T.; MARZOCCA, P. A Systematic Literature Review of Predictive Maintenance for Defence Fixed-Wing Aircraft Sustainment and Operations, *Sensors*, v. 22, n. 7070, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/s22187070>. Acesso em 20 de fevereiro de 2024.

SI, X.; WANG, W.; HU, C.; ZHOU, D. Remaining useful life estimation – A review on the statistical data driven approaches, *European Journal of Operational Research*, v. 213, p. 1-14, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2010.11.018>. Acesso em 21 de fevereiro de 2024.

SINGH, L.; SINGH, P. N.; SRIVASTAVA, P. A. *Integrated Vehicle Health Management System for Fighter Aircraft*, v. 2, n. 6., p. 120-125, 2016.

WILMERING, T. J.; RAMESH, A. V. Assessing the impact of health management approaches on system total cost of ownership. In: IEEE AEROSPACE CONFERENCE, *Proceedings [...]*, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/AERO.2005.1559697>.

PARTE 4

**RESUMOS DE PESQUISAS
RELACIONADAS,
DESENVOLVIDAS PELO
AEROLOGLAB-ITA E
EM PARCERIA COM O
INSTITUTO DE LOGÍSTICA
DA AERONÁUTICA - ILA**

Aplicação de algoritmo genético e programação de metas no problema de planejamento de manutenção de aeronaves militares

Jardel Figueira da Silva¹

SILVA, Jardel Figueira. *Aplicação de Algoritmo Genético e Programação de Metas no Problema de Planejamento de Manutenção de Aeronaves Militares*. 2018. 95f. Dissertação (Mestrado em Gestão Tecnológica) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

Atualmente, o problema de planejamento de manutenção, do inglês flight maintenance planning problem (FMPP), continua desafiando estudiosos da área de pesquisa operacional no contexto de frotas de aeronaves militares. A diferença da aviação civil para a aviação militar implica na elaboração de diferentes modelos, principalmente no que diz respeito ao objetivo e às restrições. Enquanto na aviação civil há uma grande preocupação com custos, na aviação militar o que importa é o cumprimento da missão designada. Sendo assim, os esquadrões necessitam que a máxima quantidade de aeronaves esteja disponível e que a frota seja capaz de voar a quantidade de horas requerida pelas missões no período de tempo pretendido. Um dos fatores que mais afeta a quantidade de aeronaves disponíveis em uma frota é a manutenção preventiva, ou seja, atividades realizadas regularmente para restaurar o desempenho e garantir a segurança na operação das

¹ AeroLogLab-ITA (www.aerologlab.ita.br). E-mail: jardeljfs@fab.mil.br

aeronaves. Como a realização de manutenção está diretamente relacionada ao consumo de horas de voo, é necessário balancear as horas a serem voadas por cada aeronave e as atividades de manutenção para garantir a máxima quantidade de aeronaves disponível. O processo de determinar qual aeronave irá operar e qual aeronave será submetida à manutenção é realizado de forma manual na Força Aérea Brasileira (FAB). O processo manual em uso é demasiadamente demorado, trabalhoso e não considera a disponibilidade e o esforço aéreo requerido como objetivos de médio ou longo prazo. Considerando essa perspectiva, este trabalho apresenta um método de resolução do FMPP para o modelo proposto por Kozanis e Skipis (2006), abordando o problema como multiobjetivo. O método proposto é uma combinação de uma meta-heurística evolucionária, o algoritmo genético, e um método exato, a programação de metas. Ele foi avaliado na resolução de dez instâncias com frotas compostas por 8, 16 e 32 aeronaves para 6 e 12 períodos de planejamento. Os resultados obtidos mostraram que o método híbrido é capaz de fornecer soluções de planejamento de voo e de manutenção viáveis e até mesmo indicar necessidades de replanejamento, permitindo ao gestor identificar dificuldades futuras quanto à disponibilidade da frota e quanto ao cumprimento do esforço aéreo requerido.

Palavras-chave: Sistemas complexos; Aviação militar; Planejamento de manutenção.

Aplicação de conceitos de engenharia de suportabilidade no ciclo de vida de usinas de geração de energia fotovoltaica

Lucas Fernando Seelig Rangel Arantes¹

SEELIG, Lucas Fernando Rangel Arantes. *Aplicação de conceitos de engenharia de suportabilidade no ciclo de vida de usinas de geração de energia fotovoltaica*. 2023. 111f. Dissertação (Mestrado em Gestão Tecnológica) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

Em meio ao atual processo de mudança no cenário energético, observa-se a emergência de uma tendência significativa: a eletrificação de uma ampla gama de meios de transporte, incluindo veículos terrestres e aeronaves. Esta tendência constitui um tema de grande relevância para a presente dissertação. Muitas empresas, cientes da necessidade premente de diminuir a dependência dos combustíveis fósseis e minimizar as emissões de poluentes na atmosfera, estão empenhadas na elaboração de projetos que envolvem a incorporação de sistemas elétricos, com o intuito de melhorar a relação custo benefício do sistema como um todo. Neste contexto, as usinas fotovoltaicas emergem como um recurso indispensável para satisfazer a crescente demanda por energia elétrica. Essa fonte de energia renovável oferece benefícios significativos, tanto econômicos quanto ambientais, consolidando-se como uma alternativa para essa transição energética. As usinas fotovoltaicas, além de constituírem uma

¹ AeroLogLab-ITA (www.aerologlab.ita.br). E-mail: lucas.arantes@ga.ita.br

fonte de energia sustentável, apresentam um extenso ciclo de vida, com um período de operação que podem oscilar entre 25 e 40 anos. No setor financeiro, estas usinas estão sendo cada vez mais valorizadas como uma oportunidade de investimento rentável, em vista da possibilidade de altos retornos e da contribuição significativa para a preservação ambiental. No entanto, apesar dos inúmeros benefícios, é importante enfatizar que existem desafios inerentes à manutenção e operação dessas usinas. Há a ocorrência de falhas de suportabilidade dessas instalações, com problemas como a substituição de módulos, inversores e a falta de peças sobressalentes. Estas dificuldades podem resultar em uma operação menos eficaz e, em alguns casos, levar à paralisação da usina. Dessa forma, a presente dissertação se propõe a investigar a aplicação de conceitos de engenharia de suportabilidade, tipicamente aplicados ao desenvolvimento de sistemas aeronáuticos, para sistemas de geração e distribuição de energia elétrica fotovoltaicos. Adicionalmente, a dissertação aborda possíveis estratégias para enfrentar os desafios operacionais e de suporte que as usinas enfrentam atualmente.

Palavras-chave: Engenharia de suportabilidade; Sistema fotovoltaico; Otimização.

O problema de roteamento de aeronaves e manutenção para frotas fracionadas com a inclusão de informações de prognósticos e de gerenciamento de saúde

Eduardo Afonso Pereira Barreto¹

Fernando Teixeira Mendes Abrahão²

PEREIRA BARRETO, Eduardo Afonso. *Modelling The Aircraft Maintenance Routing Problem For Fractional Fleets With The Inclusion Of Prognostics And Health Monitoring Information*. 2022. 88 f.. Tese (Doctor in Space Sciences and Technologies – Management) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2022.

Esta tese apresenta duas abordagens para modelar o problema de roteamento e manutenção de aeronaves (AMRP) para frotas compartilhadas incluindo informações de prognóstico de saúde das aeronaves: uma baseada em modelagem de risco e outra modelando estímulos para etapas de voo com oportunidades de manutenção. Estes modelos visam tratar o problema de potencial falta de efetividade sistêmica em resolver o AMRP, sem considerar todos os recursos de suportabilidade e manutenção disponíveis em sistemas aeroespaciais complexos contemporâneos. Nesse sentido, o uso de dados de prognóstico pode ser incorporado no processo de planejamento de rotas e manutenção com o intuito de reduzir custos com manutenção e reduzir tempo de aeronaves paradas

¹ E-mail: eduardopereirabarreto@gmail.com

² AeroLogLab-ITA (www.aerologlab.ita.br). E-mail: abrahamo@ita.br

devido a falhas. As soluções propostas neste trabalho constroem as rotas e as atribui às aeronaves enquanto determina o melhor momento e base para se realizar as atividades de manutenção preventiva. Modelou-se com base em casos reais informações de um sistema de monitoramento e prognóstico de falhas críticas das aeronaves. Sendo que suas ocorrências causam a indisponibilidade da aeronave até que a manutenção corretiva seja realizada. A manutenção corretiva é tratada em poucos trabalhos anteriores, e diferentemente deles, esta tese usa uma abordagem proativa para fazer um planejamento de rotas flexível que evite interrupções devido à manutenção corretiva. Foram usados vários casos para testar os modelos desenvolvidos, dentre eles casos reais de uma operadora de frotas compartilhadas e outros casos de dimensões de modo a contemplar amostras mais significativas do problema. Os modelos desenvolvidos também foram testados para frotas heterogêneas visando a refletir alternativas reais de operações de frotas compartilhadas. As contribuições desta tese incluem uma modelagem mais flexível de manutenções preventivas, permitindo que seu planejamento se adeque melhor à demanda de voos e a inclusão de informações de prognóstico de falha para planejar as rotas de forma proativa considerando interrupções específicas. Os resultados obtidos aqui demonstram o possível ganho em eficiência das soluções de roteamento, reduzindo custos de manutenção sem aumentar significativamente horas de reposicionamento.

Palavras-chave: Engenharia logística; Sistemas complexos; Manutenção de aeronaves.

Modernização de meia vida de aeronaves militares: uma definição da melhor política sob a perspectiva do decisor

José Tadeu Medeiros do Vale¹

VALE, José Tadeu Medeiros do. *Modernização de Meia Vida de Aeronaves Militares: Uma definição da melhor política sob a perspectiva do decisor*. 2018. 99f. Dissertação (Mestrado em Gestão Tecnológica) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2018.

Em que pese a teoria que trata do problema de substituição de equipamentos fazer parte de uma área do conhecimento amplamente explorada, a literatura mostra uma limitação dos métodos existentes quanto à incorporação da importância dada pelo tomador de decisão às melhorias operacionais provocadas pela ação de substituição. Por isso, esta dissertação objetiva apresentar um método para tomada de decisão sob incerteza, determinando-se o momento ótimo para a realização de uma modernização de meia vida de uma aeronave militar, sob o aspecto de substituição de equipamentos, incorporando a perspectiva de utilidade do decisor quanto aos parâmetros de decisão do problema. O método permite a definição de uma política ótima de substituição de equipamentos sob a incerteza de uma variável estocástica representada pela obsolescência tecnológica. O modelo matemático foi construído como um processo markoviano de decisão, cujas variáveis foram representadas por funções de utilidade, buscando identificar o

¹ AeroLogLab-ITA (www.aerologlab.ita.br). E-mail: abraham@ita.br

conjunto de estados e ações que representam a utilidade máxima esperada. O método foi aplicado em casos que buscam representar a tomada de decisão de substituição de equipamentos em uma frota de aeronaves militares em 3 (três) diferentes fases do ciclo de vida. Uma análise de sensibilidade foi realizada para determinar a existência de uma faixa de valores para o momento ótimo, correspondente a diferentes perfis de decisor, caracterizados por seus coeficientes de aversão, bem como para variações nos parâmetros associados aos equipamentos. Essa análise mostrou que para uma variação na faixa de -50% a +50% nos parâmetros, o valor de TMOD, que representa o momento da modernização, variou em uma faixa equivalente a 10 anos, o que representou mais de um terço do horizonte de simulação. Ainda, o uso de um modelo de agregação de resultados individuais na tratativa do problema múltiplos equipamentos, possibilitou a comparação da solução correspondente à política ótima agregada com as soluções individuais para os equipamentos, gerando uma maior flexibilidade para o decisor na avaliação de cenários alternativos. Conclui-se que o método agregado desenvolvido é capaz de fornecer soluções viáveis, dentro do horizonte simulado, para o planejamento das atividades de substituição, permitindo ao gestor identificar o momento ótimo para a modernização.

Palavras-chave: Engenharia logística; Sistemas complexos; Otimização.

Processo de seleção de componentes aeronáuticos candidatos a impressão 3d para reparos de danos de combate em aeronaves

Pedro Henrique Fonteles Dias

Fernando Teixeira Mendes Abrahão¹

DIAS, Pedro Henrique Fonteles. Processo de seleção de componentes aeronáuticos candidatos a impressão 3D para reparos de danos de combate em aeronaves. 2020. 77f. Dissertação (Mestrado Profissional em Segurança da Aviação e Aeronavegabilidade Continuada) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aeronáutica e Mecânica – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2020.

Sistemas aeronáuticos de defesa são caracterizados por serem complexos, constituídos por muitos componentes com funcionalidades integradas entre si. Garantir a suportabilidade logística eficaz e eficiente durante todo o longo ciclo de vida de sistemas aeronáuticos é igualmente complexo. Com o surgimento de novas tecnologias de fabricação, surgem oportunidades de otimização neste sentido, sobretudo nas fases do ciclo de vida de operação e serviços. Para sistemas aeroespaciais de defesa, operações em tempo de guerra são, tipicamente, conduzidas a partir de bases instaladas em áreas remotas, longe de centros de manutenção, sem ferramentas e equipamentos especializados e grandes estoques de peças de reposição. Os reparos de danos de combate em aeronaves (ABDR, do inglês Aircraft Battle Damage

¹ AeroLogLab-ITA (www.aerologlab.ita.br). E-mail: abrahao@ita.br

Repair) visam ao retorno da aeronave danificada à condição de disponível, com algum grau de capacidade de combate relevante ao desenvolvimento do conflito. Isso significa que os reparos não necessariamente retornam a aeronave às suas condições originais de aeronavegabilidade, como nas manutenções padrão em tempos de paz. Para isso, peças de reposição podem ser necessárias em ABDR, necessitando que se mantenha estoques nas bases instaladas em locais remotos. Por meio da impressão 3D, surge a possibilidade de que itens de suprimentos sejam fabricados sob demanda no local de consumo, simplificando a cadeia de suprimentos. Dentro deste contexto, a utilização da tecnologia de impressão 3D é uma alternativa para otimização da suportabilidade de sistemas complexos aeronáuticos em tempos de guerra. Redução do tempo de reparo, redução dos níveis de estoque, redução do risco de indisponibilidade, redução de custos operacionais e aumento da segurança de voo foram elencados como os potenciais impactos resultados da aplicação de impressão 3D em reparos de danos de combate em aeronaves. A principal contribuição do trabalho está na modelagem da análise com múltiplos critérios que integram aspectos tecnológicos e de logística na seleção de componentes aeronáuticos candidatos a utilizar a impressão 3D como multiplicador dos índices de disponibilidade para frotas, quando em situação de combate.

Palavras-chave: Impressão tridimensional; Controle de estoques; Manutenção de aeronaves; Engenharia logística.

Conceitos de engenharia logística aplicados à operação de lançamento de veículos sub orbitais

Guilherme Sousa de Morais¹

Fernando Teixeira Mendes Abrahão²

MORAIS, Guilherme Sousa de. *Conceitos de Engenharia Logística aplicados à Operação de Lançamento de Veículos Suborbitais*. 2022. 61f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Aeronáutica) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São Jose dos Campos, 2022.

Este estudo apresenta uma aplicação de conceitos logísticos na operação de lançamento de veículos suborbitais. Tomou-se para estudo o caso do Centro de Lançamento de Alcântara (CLA) por ser o principal centro de lançamento do Brasil, possuindo importância estratégica para o programa espacial brasileiro, e pela introdução do Centro Espacial Alcântara (CEA), iniciativa que permitirá o lançamento de veículos estrangeiros na área do CLA, atraindo novos projetos, novos investimentos e, principalmente para o escopo desse trabalho, uma frequência de operações nunca realizada anteriormente. Ao longo da aplicação desses conceitos, foram identificadas as principais restrições de suporte responsáveis pela indisponibilidade dos equipamentos do Centro, além de algumas ações gerenciais que poderão otimizar a gestão da qualidade na previsão dos eventos de falha. O trabalho

¹ E-mail: guilherme.morais@ga.ita.br

² AeroLogLab-ITA (www.aerologlab.ita.br). E-mail: abraham@ita.br

também tem como objetivo a realização de uma simulação para diagnosticar quantitativamente a atual situação logística do Centro e os impactos que as soluções propostas implicariam no cenário de suporte.

Palavras-chave: Engenharia logística; Sistemas complexos; Simulação.

Modelagem multiobjetivo para dimensionamento de recursos em suporte a operações de fiscalização em fronteiras

Fabio Ayres Cardoso¹

Fernando Teixeira Mendes Abrahão²

CARDOSO, Fábio Ayres. *Modelagem Multiobjetivo para Dimensionamento de Recursos em Suporte a Operações de Fiscalização em Fronteiras*. 2019. 124f. Tese (Doutorado em Gestão Tecnológica) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2019.

Patrulhas militares tem sido empregadas em áreas fronteiriças para coibir ilícitos transnacionais, como o narcotráfico, o contrabando de produtos e a exploração ilegal de recursos naturais. Por intermédio de ações de fiscalização episódica em pontos de alto índice de criminalidade, as patrulhas integram deslocamentos sucessivos a estacionamentos temporários nesses pontos, respeitando janelas de tempo predefinidas. Com o objetivo de otimizar seus resultados, permanências adicionais são permitidas nos locais com maior probabilidade de incidência de delitos. Tendo em vista o vazio logístico existente em determinadas fronteiras, bem como atual carência de recursos para operações militares, a definição do montante mais econômico de patrulhas e de bases logísticas para apoiá-las tem se tornado um desafio. Por isso, o objetivo deste trabalho é modelar o problema por meio de um arcabouço de

¹ E-mail: cardosoaf@yahoo.com.br

² AeroLogLab-ITA (www.aerologlab.ita.br). E-mail:abrahamo@ita.br

otimização matemática capaz de, em tempo satisfatório, auxiliar na definição da quantidade mínima de bases logísticas e patrulhas, de forma a maximizar as ações de fiscalização na fronteira. Como contribuição original, propõe-se um modelo multiobjetivo iterativo que integra as tarefas de quantificação e designação de bases logísticas; quantificação, alocação e roteirização, com máxima cobertura de patrulhas; atendimento a janelas de tempo com permanência adicional nos pontos de maior probabilidade de incidência de delitos. São tomadas como assunções, por exemplo, a estabilidade das condições da missão de fiscalização (número de patrulhas, pontos de fiscalização, programação das visitas etc.), a equipolência e independência das patrulhas, e a jornada restrita a um dia de operação. A fim de garantir soluções oportunas, o modelo contou com a exploração de duas diferentes meta-heurísticas - Otimização Baseada em Buraco Negro e Otimização por Nuvem de Partículas - em cenários reais de patrulhamento. As soluções obtidas, sob diferentes instâncias, foram avaliadas quanto a dois traços fundamentais - qualidade da solução e tempo de processamento - e cotejados com expedientes produzidos pela técnica atual, demonstrando a validade da modelagem em prover, tempestivamente, esquemas de patrulhamento fronteiriço que asseguram alta cobertura, com o mínimo de recursos.

Palavras-chave: Sistemas complexos; Engenharia logística; Otimização.

Isolamento de falhas em sistemas de navegação inercial com redundância mínima por meio de sensores auxiliares

Tibor Thiesen Dumont¹

Fernando Teixeira Mendes Abrahão²

PITREZ, Tibor Thiesen Dumont. *Isolação de Falhas em Sistemas de Navegação Inercial com Redundância Mínima por Meio de Sensores Auxiliares*. Dissertação (Mestrado em Ciências e Tecnologias Espaciais) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2020.

Esta Dissertação de Mestrado apresenta duas alternativas que permitem contornar o problema de isolação de falhas em um sistema de navegação inercial com 4 sensores de cada tipo (girômetros ou acelerômetros). As soluções apresentadas no trabalho foram feitas para serem implementadas em sistemas de navegação inercial puros, ou seja, sem fusão ou auxílio de sensores de outra natureza. O trabalho é feito, na maior parte de sua redação, para girômetros, mas, devido à natureza vetorial das grandezas medidas, o mesmo método pode ser utilizado para acelerômetros ou qualquer outro conjunto de sensores de grandezas vetoriais. Em um sistema de navegação com 4 girômetros, por exemplo, em caso de falha de um dos sensores, é possível realizar a detecção da falha (perceber que algum sensor falhou), mas não é possível isolar qual sensor falhou,

¹ E-mail: tiborpi3@gmail.com

² AeroLogLab-ITA (www.aerologlab.ita.br). E-mail: abrahao@ita.br

exceto em falhas muito particulares. Isso faz com que o sistema de navegação inercial, dependendo da magnitude da falha, não consiga mais cumprir a missão. Em um sistema com 5 sensores, é sempre possível isolar o sensor defeituoso, porém, a adição de um sensor de mesma qualidade dos demais pode ser muito cara, extrapolando o orçamento do projeto. O objetivo deste trabalho é identificar, embasar com evidências e desenvolver um método a ser usado como solução para este problema de isolamento de falhas, em sistemas com apenas 4 sensores, sem acrescentar o custo de um sensor adicional de mesma qualidade que os demais. Tal objetivo foi cumprido com duas soluções diferentes. A primeira solução apresentada neste trabalho é a utilização de um sensor inercial auxiliar de menor qualidade (e mais barato) junto aos 4 sensores principais, de forma a auxiliar a etapa de isolamento de falhas. A outra solução é a utilização de um cluster de sensores de qualidade ainda menor (e ainda mais baratos) para auxiliar a atividade de isolamento de falhas. Estes sensores auxiliares não são, a priori, utilizados para a navegação do sistema. Ambas as soluções apresentadas tiveram resultados positivos, com maior destaque para a primeira, e o sistema deve ser sintonizado de acordo com os requisitos e orçamentos dos projetos. No geral, este trabalho é um estudo de Detecção, Isolamento e Recuperação de Falhas (FDIR, acrônimo em inglês), com o foco na etapa de isolamento.

Palavras-chave: Engenharia logística; Sistemas complexos de defesa; Diagnóstico de falha.

Método híbrido para diagnóstico de falha aplicado a um modelo de trem de pouso

Dennys Wallace Duncan Imbassahy¹

DUNCAN IMBASSAHY, Dennys Wallace. *A hybrid method to diagnose abnormal situations applied to a landing gear model*. 93f. Dissertação (Mestrado em Ciências e Tecnologias Espaciais) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2020.

Os sistemas aeroespaciais são compostos por centenas ou milhares de componentes e subsistemas complexos que necessitam, dentre vários outros fatores, de algoritmos de detecção e isolamento de falhas que permitam sua operação correta e segura. Através da literatura, é possível encontrar um número considerável de trabalhos no estado da arte com soluções específicas ao caso o qual são empregadas, contudo é desafiador reutilizá-los em benefício de trabalhos semelhantes. Em geral, mesmo diferenças sutis em subsistemas ou componentes análogos requerem um esforço significativo para adaptar e empregar tais algoritmos. Para sanar tal problema, este trabalho propõe o método *Generic Anomaly Diagnosis Hybridisation Algorithm* (GADHA), que em português significa Algoritmo Genérico de Hibridização para Diagnóstico de Anomalias, visando um algoritmo generalizável e reutilizável. A solução consiste em analisar diferentes algoritmos de aprendizado supervisionado de máquina, combinados em

¹ AeroLogLab-ITA (www.aerologlab.ita.br). E-mail:dennysduncan@gmail.com

conjuntos, um modelo físico opcional do sistema aeroespacial e dois níveis de decisão para estimar o estado atual do sistema. No final, o algoritmo proposto pode garantir, pelo menos, igual ou mais tipicamente, melhor acurácia na detecção e isolamento de falhas do que apenas a aplicação isolada de tais algoritmos. Para isso, requer poucas adaptações e baixo custo de implementação.

Palavras-chave: Engenharia logística; Sistemas complexos de defesa; Diagnóstico de falha.

Modelo de aprendizado de máquina para validação de dados de defeito das aeronaves T-27

Lucas Antônio Silva¹

Rachel Andrade Ballardin²

Jardel Figueira da Silva³

SILVA, Lucas Antônio. *et al. Modelo de aprendizado de máquina para validação de dados de defeito das aeronaves T-27*. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Logística - CESLOG) – Instituto de Logística da Aeronáutica, São Paulo.

Este trabalho analisa o desempenho de modelos de machine learning para validação de dados de defeito das aeronaves T-27. Tal abordagem se justifica pela grande quantidade de entradas inadequadas desses dados, diminuindo a confiança nos indicadores de confiabilidade que deles dependem e exigindo em suas análises uma conferência individual que possui potencial de ser automatizada. O objetivo deste estudo é levantar técnicas de machine learning aplicáveis à classificação dos textos descritivos das possíveis falhas e analisar suas performances na filtragem desses dados. Este propósito foi alcançado mediante pesquisa bibliográfica na área de aprendizado de máquina aplicada à classificação de textos, seguida de um estudo de caso para os dados das aeronaves T-27, que passou por validar manualmente

¹ E-mail: lcsilvap@gmail.com

² E-mail: ballardinchel@gmail.com

³ E-mail: jardeljfs@fab.mil.br

mais de 7000 Fichas de Coleta de Dados de Defeito. A análise evidenciou que o melhor modelo obtido, uma combinação de modelos *Support Vector Classifier*, Regressão Logística e *Naive Bayes Multinomial*, possui F1-macro de 0,9454 e acurácia de 96,33%, sendo este desempenho superior à das técnicas tradicionais que são empregadas atualmente. O modelo também se mostrou promissor na correção de indicadores gerenciais de confiabilidade.

Palavras-chave: dados de defeito; aprendizado de máquina; machine learning; confiabilidade.

Avaliação da alteração do programa de manutenção das aeronaves A-29 da força aérea brasileira

Jefferson Rodrigues de Sousa¹

Rachel Andrade Ballardin²

Jardel Figueira da Silva³

SOUZA, Jefferson Rodrigues de. *et al.* *Avaliação da alteração do programa de manutenção das aeronaves a-29 da força aérea brasileira*. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Logística - CESLOG) – Instituto de Logística da Aeronáutica, São Paulo.

Este trabalho analisa a alteração do programa de manutenção das aeronaves A-29 da Força Aérea Brasileira. Tal abordagem se faz necessária por não haver garantia de que o desempenho da frota de aeronaves tenha melhorado quanto à confiabilidade, incidência de falhas e disponibilidade operacional. O objetivo deste trabalho é avaliar a eficácia da alteração do Programa de Manutenção das Aeronaves A-29, verificando se houve melhora no desempenho da frota no que diz respeito à confiabilidade do sistema, incidência de falhas e disponibilidade. Este intento foi conseguido por meio da revisão bibliográfica e análise documental dos programas de manutenção anterior e posterior à mudança.

¹ E-mail: sousajrs@fab.mil.br

² E-mail: ballardinchel@gmail.com

³ E-mail: jardeljfs@fab.mil.br

Esta análise comparativa se deu por meio de coleta e análise dos dados de falha e disponibilidade compreendidos entre 2017 e 2022. O estudo evidenciou que houve um impacto positivo na confiabilidade e na incidência de falhas do sistema aeronave. Além disso, ficou evidenciado um incremento de disponibilidade na frota de aeronaves após a utilização do novo programa de manutenção. Contudo, quando avaliados os sistemas que compõem as aeronaves, não foram todos que se beneficiaram da alteração do programa de manutenção, de modo que houve piora no índice confiabilidade e incidência de falhas para alguns deles.

Palavras-chave: confiabilidade; disponibilidade; programa de manutenção.

Comparação de custos entre contratos de logística baseada em desempenho e contratos de serviços sob demanda - modelagem, otimização e simulação com ferramentas *opus suite*

Filipe Batista Ribeiro Costa¹

Rachel Andrade Ballardin²

Daniel Cherobini³

COSTA, Filipe Batista Ribeiro. *et al. Comparação de custos entre contratos de logística baseada em desempenho e contratos de serviços sob demanda - modelagem, otimização e simulação com ferramentas opus suite*. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Logística - CESLOG) – Instituto de Logística da Aeronáutica, São Paulo.

Este trabalho descreve a comparação, em termos de custos, de um contrato de Logística Baseada em Desempenho e um contrato de serviços sob demanda, utilizando as ferramentas de modelagem, otimização e simulação da *OPUS Suite*. Tal abordagem se faz necessária pela possibilidade de uma contratação baseada em Desempenho gerar vantagens a longo prazo, como o aumento de disponibilidade e mitigação de obsolescência para a frota de aeronaves da Força Aérea Brasileira (FAB) e seus equipamentos, em relação às contratações tradicionais. O objetivo deste trabalho

¹ E-mail: batistafbrc@fab.mil.br

² E-mail: ballardinchel@gmail.com

³ E-mail: cherobinidc@fab.mil.br

é criar elementos de comparação entre dois tipos de solução logística para suporte a sistemas de armas: as contratações firmadas por demanda (T&M: Time & Material) e as fundadas em Logística Baseada em Desempenho (ou contratações PBL - Performance-Based Logistics). Esta avaliação foi feita com o auxílio de simulações de Monte Carlo fornecidas pelo software SIMLOX, a partir da modelagem de uma estrutura de suporte logístico definida com apoio do software OPUS10, focando nos aspectos de custo e desempenho. Ao fim, foram observadas as eventuais vantagens e desvantagens da implementação de contratos PBL, de acordo com os resultados obtidos. Para tanto, inicialmente conduziu-se uma revisão bibliográfica de estudos relacionados a esta área de pesquisa, seguida da elaboração do modelo a ser avaliado, a partir do qual foram conduzidos os testes de simulação, assim possibilitando a análise dos resultados verificados. Esta pesquisa demonstrou que a estrutura de contratos PBL torna sua precificação mais sensível às alterações de parâmetros típicos do sistema e organização de suporte logístico, em comparação aos contratos T&M, e que esse tipo de contrato pode ser uma alternativa aos contratos tradicionais, gerando benefícios à FAB, desde que sua elaboração e implementação sejam feitas de maneira adequada e no contexto apropriado.

Palavras-chave: contrato; logística baseada em desempenho; parâmetros de desempenho.

Sobre os Organizadores

Claudio Stacheira - Pós-doutorando em Ciências (Gestão) pelo Programa de Pós-Graduação em Ciências e Tecnologias Espaciais, do Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA. Doutor em Desenvolvimento, Sociedade e Cooperação Internacional pela Universidade de Brasília – UnB. Mestre em Gestão do Conhecimento e da Tecnologia da Informação e Especialista em Gestão de Projetos pela Universidade Católica de Brasília – UCB. Professor do quadro permanente da Universidade Estadual de Goiás – UEG vinculado ao Instituto Acadêmico de Ciências Tecnológicas, com atuação no curso de graduação em Sistemas de Informação, no Programa de Pós-graduação em Propriedade Intelectual e Transferência de Tecnologia para a Inovação – PROFNIT e no Programa de Pós-Graduação em Gestão, Educação e Tecnologias – PPGET. Líder do Grupo de Pesquisa em Desenvolvimento e Tecnologias Aplicadas – Gedetec-UEG. Membro do Comitê da Indústria de Defesa e Segurança da Federação das Indústrias do Estado de Goiás (COMDEFESA-GO). Tem experiência profissional, perfil e formação acadêmica interdisciplinar. Seus trabalhos são nas áreas de sistemas organizacionais, gestão de processos, gestão de ciência, tecnologia e inovação para o desenvolvimento, alinhamento entre estratégia organizacional e competências, planejamento e gestão estratégica.

Fernando Teixeira Mendes Abrahão - Oficial Aviador da Força Aérea Brasileira pela Academia da Força Aérea – AFA/FAB. Mestre em Gerenciamento de Manutenção, Gerenciamento Logístico e Gerenciamento Logístico do Processo de Aquisição pelo Air Force Institute of Technology – AFIT/USA. Doutor em Engenharia de Transportes pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – USP. Docente/pesquisador do Programa de Pós-graduação em

Ciências e Tecnologias Espaciais (Gestão) do ITA. Foi Gerente de Programas de Aquisição e de Gerenciamento do Ciclo de Vida de Sistemas Aeronáuticos na Subdiretoria de Desenvolvimento e Programas SDDP/COPAC. Professor do Curso de Especialização em Logística do Instituto de Logística da Aeronáutica - ILA, ambos da Força Aérea Brasileira. Foi Pró-Reitor de Administração no ITA. É Chefe Coordenador do Laboratório de Engenharia Logística do ITA - AeroLogLab-ITA.

Henrique Costa Marques - Oficial Aviador da Força Aérea Brasileira pela Academia da Força Aérea – AFA/FAB. Mestre e Doutor em Engenharia Eletrônica e Computação pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA. Docente/pesquisador do Programa de Pós-graduação em Ciências e Tecnologias Espaciais (Gestão) do ITA. Foi responsável pela estruturação inicial do Laboratório de Comando e Controle do ITA. Integra a equipe do AeroLogLab-ITA. Tem experiência na área de Comando e Controle, atuando principalmente nos seguintes temas: simulação, comando e controle, operações conjuntas, fusão de dados em alto nível e Ontologias probabilísticas. Atualmente realiza pesquisas nas áreas de E-Maintenance, Integrated Vehicle Health Management - IVHM, Prognostics and Health Management - PHM e Realidade Virtual/Aumentada/Mista para aplicações na área de operação e manutenção de sistemas complexos.

Guilherme Conceição Rocha - Engenheiro Mecânico-Aeronáutico, Mestre em Engenharia Aeronáutica e Mecânica e Doutor em Engenharia Eletrônica e Computação pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA. Foi Engenheiro de Desenvolvimento de Produtos da Embraer e Diretor Técnico e Operacional da Konatus Soluções Inteligentes. Tem experiência na área de Engenharia Mecânica, com ênfase em engenharia de sistemas, logística, manutenção,

modelagem e controle de sistemas, atuando principalmente nos domínios da aviação, indústria automobilística e setor da saúde. Atualmente é Professor Adjunto do ITA e integra a equipe do AeroLogLab-ITA, atuando na pesquisa e desenvolvimento de projetos relacionados à certificação, manutenção, operação e gerenciamento de riscos de sistemas críticos.

Antonio Celio Pereira de Mesquita - Doutor em Ciências (Engenharia Eletrônica e Computação) pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA. Mestre em Engenharia de Sistemas Logísticos pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - USP. Especialista em Planejamento, Implementação e Gestão de Educação a Distância pela Universidade Federal Fluminense - UFF, e Engenheiro de Eletrônica pela Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco. Possui ampla experiência na área de Engenharia Eletrônica, com ênfase em Eletrônica Analógica, Equipamentos de Comunicação, Aviônica e Manutenção de Aeronaves. Também é especialista em interpretação de imagens orbitais e suborbitais para aplicações militares. Atua como Analista de Sistemas, com experiência em RUP e UML, além de desenvolver em diversas linguagens de programação, incluindo VBA, C++, Go, PHP e Python, utilizando bancos de dados MS SQL Server e MySQL. Atualmente, integra a equipe do AeroLogLab-ITA, onde realiza pesquisas sobre o gerenciamento da suportabilidade ao longo do ciclo de vida de sistemas. Coordena, ainda, o desenvolvimento da interface homem-máquina de um simulador de reação exotérmica com dinâmica computacional de fluidos.

Sobre os/as Autores/as

Alexandre Dias Irigon - Oficial Aviador da Força Aérea Brasileira pela Academia da Força Aérea – AFA/FAB. Tem experiência na área de Engenharia Aeroespacial, com ênfase em Materiais e Processos para Engenharia Aeronáutica e Aeroespacial. Especialista em Gestão Pública e Emprego da Força Aérea pela Universidade da Força Aérea - UNIFA.

Daniel Buch - Engenheiro Industrial-Mecânico pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR. Especialista em Logística Empresarial e Logística pelo Instituto de Logística da Aeronáutica - ILA. Mestre em Ciências pelo Programa de Pós-Graduação em Ciências e Tecnologias Espaciais do Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA. É Oficial engenheiro da Força Aérea Brasileira e possui experiência na área de suporte logístico, com ênfase em engenharia de suporte continuado de motores aeronáuticos.

Daniel Cherobini - Engenheiro Mecânico-Aeronáutico pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA. Especialista em Logística Empresarial pela Faculdade Pitágoras e em Liderança com Ênfase em Gestão no Comando da Aeronáutica pela Universidade da Força Aérea – UNIFA. Mestre em Logistics and Supply Chain Management pelo Air Force Institute of Technology – AFIT/USA. Atualmente é pesquisador, consultor e instrutor do Instituto de Logística da Aeronáutica - ILA. Tem experiência nas áreas de Engenharia Logística, de Manutenção e de Confiabilidade, com ênfase em Sistemas de Defesa.

Danilo Garcia Figueiredo Pinto - Engenheiro Eletrônico pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA. Mestre em Gerenciamento de Aquisição de Defesa pela Cranfield University

(Inglaterra). Doutor em Ciências pelo Programa de Pós-Graduação em Ciências e Tecnologias Espaciais do Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA. Possui experiência na área de logística militar, gestão de projetos aeronáuticos, gestão de riscos de redes de suprimento, gestão de contratos, desenvolvimento de planos de manutenção aeronáuticos e, mais recentemente, como pesquisador e desenvolvedor na área de modelagem e simulação de sistemas complexos. Trabalhou como Consultor de Projetos Logísticos na Divisão de Pesquisa e Desenvolvimento do Instituto de Logística da Aeronáutica - ILA, onde continua colaborando como instrutor e palestrante, e no Parque de Material Aeronáutico de São Paulo como Coordenador de vários projetos, dentre os quais se destacam os Projetos VC-1 (AIRBUS A319-CJ) e VC-2 (EMBRAER 190 PR), que constituem a frota principal de transporte aéreo da Presidência da República do Brasil. Atualmente atua no ITA como professor e pesquisador do Laboratório de Engenharia Logística – AeroLogLab.

Dennys Wallace Duncan Imbassahy - Oficial Aviador da Força Aérea Brasileira pela Academia da Força Aérea – AFA/FAB. Mestre em Ciências pelo Programa de Pós-Graduação em Ciências e Tecnologias Espaciais do Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA. Tem experiência na área de Defesa, detecção de falhas em sistemas complexos com método híbrido de Aprendizado de Máquina e Teoria de Sistemas. Realizou diversos cursos na área de desenvolvimento de software e redes. Possui certificação em linguagem de programação JAVA.

Diego Sodré de Souza - Engenheiro Aeronáutico pela Universidade de Taubaté. Engenheiro de Suporte ao Cliente da Embraer, na área de Defesa & Segurança. Mestre pelo Programa de Pós-gradua o em Engenharia de Infraestrutura Aeronáutica do

Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA, na área de Transporte Aéreo e Aeroportos.

Eduardo Afonso Pereira Barreto - Engenheiro Aeronáutico formado pela Universidade Federal de Uberlândia – UFU. Doutor em Ciências pelo Programa de Pós-Graduação em Ciências e Tecnologias Espaciais do Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA. Tem experiência na área de Engenharia Aeroespacial, atuando principalmente nos seguintes temas: análise de custos de ciclo de vida, gráfico de precedência conjunta, engenharia de sistemas, design para Reliability, Availability and Maintainability (RAM) e balanceamento de linha.

Fabio Ayres Cardoso - Pós-doutorando em Logística no Instituto Militar de Engenharia - IME. Doutor em Ciências pelo Programa de Pós-Graduação em Ciências e Tecnologias Espaciais do Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA. Mestre em Logistics and Supply Chain Management, pelo Air Force Institute of Technology – AFIT/USA. Bacharel em Ciências de Logística e Administração Pública na Academia da Força Aérea (1999). Professor Permanente do Programa de Pós-Graduação em Ciências Aeroespaciais, da Universidade da Força Aérea - UNIFA. Tem experiência na área de Defesa, com ênfase em Logística de Combate e Gestão de Defesa.

Filipe Batista Ribeiro Costa - Oficial na Força Aérea Brasileira - FAB. Engenheiro Eletrônico pela Universidade de Brasília – UnB, com ênfase em Microeletrônica. Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Eletrônica da UnB.

Guilherme Sousa de Moraes - Engenheiro Aeronáutico pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA, com estudos sobre

Conceitos de Engenharia Logística, aplicados à operação de lançamento de veículos suborbitais.

Jardel Figueira da Silva - Engenheiro Aeronáutico pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA. Mestre em Ciências pelo Programa de Pós-Graduação em Ciências e Tecnologias Espaciais do ITA. Consultor do Instituto de Logística da Aeronáutica - ILA, atuando principalmente nos seguintes temas: confiabilidade, programa de manutenção e logística.

Jefferson Rodrigues de Sousa - Oficial Engenheiro Mecânico-Aeronáutico da Força Aérea Brasileira pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA. Especialista em Logística Empresarial e Logística pelo Instituto de Logística da Aeronáutica - ILA.

João Henrique Amorim de Almeida - Possui graduação em Tecnologia em Manutenção de Aeronaves pela Faculdade de Tecnologia de São José dos Campos. Engenheiro Aeronáutico pela Faculdade de Tecnologia de São José dos Campos - ETEP. Mestre em Ciências pelo Programa de Pós-Graduação em Ciências e Tecnologias Espaciais do Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA. Tem experiência na área de Engenharia Aeroespacial, com ênfase em Certificação Aeronáutica no Design, Produção e Aeronavegabilidade.

José Nogueira da Mata Filho - Engenheiro Elétrico pela Universidade Veiga de Almeida. Mestre em Engenharia Aeronáutica e Mecânica e Doutor em Ciências pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA. Foi Engenheiro de Desenvolvimento de Produto na Embraer. Tem experiência na área de Manutenção Elétrica, Aviônica e Aeronáutica, com ênfase em Confiabilidade de Sistemas e Manutenção Centrada em Confiabilidade, atuando

há mais de 30 anos nas áreas da indústria aeronáutica no processo de desenvolvimento de produtos, sendo responsável pela confiabilidade, manutenibilidade e análises de MSG-3 para desenvolvimento do plano de manutenção. Durante este período, atuou ainda por mais de 15 anos como representante credenciado da autoridade (PCP - ANAC).

José Tadeu Medeiros do Vale - Oficial Engenheiro Eletrônico da Força Aérea Brasileira pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA. Especialista em Gestão Pública pela Universidade da Força Aérea - UNIFA. Mestre em Ciências pelo Programa de Pós-Graduação em Ciências e Tecnologias Espaciais do ITA. Tem experiência na área de logística aplicada à manutenção de sistemas aeronáuticos.

Leandro da Fonseca Assumpção - Bacharel em Aplicações Militares pela Academia Militar das Agulhas Negras. Mestre em Ciências pelo Programa de Pós-Graduação em Ciências e Tecnologias Espaciais do Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA. Tem experiência na área de Defesa.

Lucas Antônio Silva - Oficial Engenheiro da Força Aérea Brasileira. Especialista em Logística Empresarial e Logística pelo Instituto de Logística da Aeronáutica - ILA.

Lucas Fernando Seelig Rangel Arantes - Engenheiro Eletricista em experiência em eletroeletrônica. Mestre e Doutor em Ciências pelo Programa de Pós-Graduação em Ciências e Tecnologias Espaciais do Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA.

Lucas Sales Martins - Oficial Engenheiro Mecânico da Força Aérea Brasileira. Especialista em Logística Empresarial pelo

Centro Universitário do Sul de Minas. Mestre em Ciências pelo Programa de Pós-Graduação em Ciências e Tecnologias Espaciais do Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA.

Pedro Henrique Fonteles Dias - Engenheiro Mecânico pela Universidade Federal do Ceará – UFC. Mestre em Engenharia pelo Programa de Pós-graduação em Segurança de Aviação e Aeronavegabilidade Continuada do Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA.

Rachel Andrade Ballardin - Doutora em Educação pela Universidade Metodista de Piracicaba. Mestre em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. Especialista em Marketing pela Fundação Getúlio Vargas – FGV. Bacharel em Secretariado Executivo Bilingue pelo Centro Universitário Newton Paiva. Experiência na indústria automobilística atuando nas áreas de Recursos Humanos, Finanças, Comercial, Logística e Compras de Serviços Logísticos.

Sérgio Rebouças - Oficial da Força Aérea Brasileira. Mestre em Engenharia Aeronáutica e Mecânica - Produção e Doutor em Ciências e Tecnologias Espaciais pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA. Tem experiência na área de Defesa, com ênfase em Aviação Militar, atuando principalmente nos seguintes temas: operações aéreas, segurança de voo, alocação de recursos e de armas, gerenciamento de frota de aeronaves e de infraestruturas aeroportuárias, gerenciamento e controle de espaço aéreo, métodos de estruturação de problemas complexos e análise de decisão sob incerteza, suportabilidade logística de sistemas aeroespaciais complexos e e-maintenance, modelos de previsão e métodos de otimização exatos e estocásticos, sistemas logísticos de transporte e distribuição de cargas, pesquisa operacional

aplicada a problemas de transporte aéreo, probabilidade e estatística, delineamento de experimentos aplicados à avaliação operacional, modelos econométricos, inteligência computacional e ciência de dados.

Talitha Cruz de Oliveira - Engenheira Aeroespacial pela Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG. Mestre Ciências pelo Programa de Pós-Graduação em Ciências e Tecnologias Espaciais do Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA. Tem experiência na área de Engenharia Aeroespacial, com ênfase em Engenharia de Sistemas, atuando principalmente nos seguintes temas: logística de sistemas complexos, modelagem de processos, gerenciamento, validação e verificação de requisitos e integração de sistemas.

Tibor Thiesen Dumont Pitrez - Oficial Engenheiro na Força Aérea Brasileira. Graduado em Engenharia Aeroespacial e Mestre em Ciências e Tecnologias Espaciais pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA.

SOBRE O LIVRO

Formato: 16x22,5
Tipologia: Proda Sans
Número de Páginas: 330
Suporte do livro: e-Book

Todos os direitos reservados.

Universidade Estadual de Goiás
BR-153 – Quadra Área, Km 99
75.132-903 – Anápolis-GO
www.ueg.br / Fone: (62) 3328-4866

2024

Impresso no Brasil / Printed in Brazil



Esta é uma publicação conjunta entre o Laboratório de Engenharia Logística (AeroLogLab-ITA) do ITA e o Laboratório de Tecnologia em Sistemas, Produção e Logística (Teclog) da UEG, com o apoio da CAPES e do CNPq.

