

# Método de Apoio à Decisões de Projeto Baseado no Custo do Ciclo de Vida e na Estrutura de Suporte

Daniel Buch<sup>1</sup> e Fernando Teixeira Mendes Abrahão<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos/SP – Brasil

**Resumo** – Este trabalho modela uma estratégia para seleção de soluções de projeto, na fase de desenvolvimento, com base no reflexo destas no custo do ciclo de vida. Para tanto, adotou-se uma modelagem dos aspectos de suportabilidade e empregou-se otimização simultânea da estratégia de suporte, da alocação de recursos, da localização de estoques e de seus níveis, permitindo comparações de custo detalhadas. Um estudo de caso comparou a integração do conceito de manutenção modular e do não modular a um motor aeronáutico, apontando que o conceito modular traz uma redução global no custo de suporte, mas pode ter um desempenho inferior nos custos com manutenção preventiva, além de gerar concentração de esforços no segundo escalão de manutenção. O estudo aponta que a otimização da estratégia de suporte resulta em ganhos consideráveis no desempenho do suporte logístico, mostrando ser relevante seu emprego na avaliação de soluções de projeto.

**Palavras-Chave** – Suportabilidade de Sistemas Complexos, Engenharia Logística, Estratégia de Suporte.

## I. INTRODUÇÃO

A suportabilidade pode ser definida como o grau em que o sistema de suporte do produto atende aos requisitos operacionais [1], conceito que se refere às características inerentes do produto que permitem que seu suporte continuado, ao longo do ciclo de vida, ocorra de forma eficaz e eficiente [2]. Este conceito torna-se especialmente importante para o caso de sistemas complexos, que envolvem elevados custos de aquisição e suporte, este potencializado pela longa expectativa de vida em serviço [3].

O ciclo de vida de um produto é dividido em cinco fases: preparação, desenvolvimento, produção, serviço e descarte [1]. A fase de serviço também recebe o nome de operação e suporte [2] e, em geral, é a fase mais longa e onerosa do ciclo de vida. No entanto, são nas fases iniciais do desenvolvimento que se concentram as oportunidades de economia no custo do ciclo de vida, conforme representa a curva da Fig. 1.

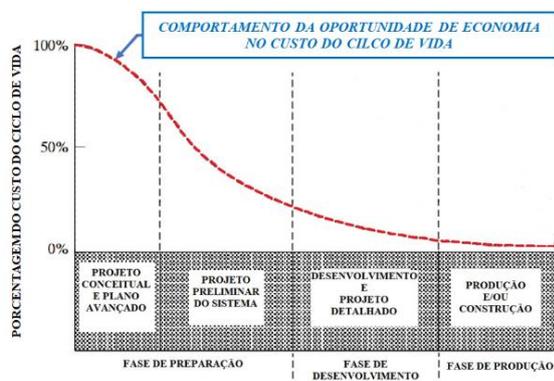


Fig. 1. Oportunidade de economia no ciclo de vida. Adaptado de [4].

Neste contexto surge a Engenharia Logística, que é responsável pela integração de considerações de suporte em todas as fases do ciclo de vida, definindo e influenciando a infraestrutura de suporte [5]. Um dos desafios de desenvolvedores de sistemas complexos, tratado pela Engenharia Logística, é a previsão do custo da fase de operação e suporte, dada a relevante influência deste no custo total do ciclo de vida.

O problema de pesquisa deste trabalho é a previsão do impacto sobre os custos de operação e suporte de distintas soluções de projeto. Será proposto um método, a ser aplicado no desenvolvimento de um produto, baseado na modelagem dos aspectos de suportabilidade de distintas soluções de projeto, com o objetivo de comparar custos de suporte em vida, dado o requisito de nível de serviço, apoiando as análises comparativas e estudos de *trade-off* recomendados por [4] para as fases iniciais do desenvolvimento de um sistema, bem como apoiando as análises de viabilidade econômica propostas por [2]. Para obtenção desta previsão, será adotada uma abordagem de otimização que leva em consideração a estratégia de suporte, a localização e os níveis de estoque e a alocação dos recursos.

Para ilustrar a aplicação do método, será proposto um estudo de caso comparando conceitos de manutenção alternativos para um motor aeronáutico em desenvolvimento.

Para atender ao seu propósito, este trabalho parte da fundamentação teórica apresentada na próxima seção, seguida da descrição do método proposto e do estudo de caso. Os resultados deste estudo serão apresentados, analisados e discutidos na seção IV. O trabalho finaliza com a apresentação das conclusões na seção V.

## II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A fundamentação teórica foi resumida nos tópicos a seguir.

### A. Previsão do custo do ciclo de vida de sistemas complexos

Um dos atuais desafios de pesquisa é a previsão do custo do ciclo de vida de sistemas complexos, visto que os processos logísticos a serem mapeados são permeados por incertezas, que são agravadas pelas projeções para longos horizontes de tempo [3]. Este custo abrange todas as fases do ciclo de vida, incluindo custos de pesquisa, desenvolvimento, produção, aquisição, operação, suporte e descarte [1]. Como o objetivo deste trabalho é avaliar custos decorrentes do suporte à operação, as análises ocorrerão sobre o custo de suporte em vida, conhecido pela sigla LSC (*Life Support Cost*), que compõe parte significativa do custo do ciclo de vida [4].

Devido ao impacto sobre o LSC das decisões tomadas nas fases iniciais do desenvolvimento de um sistema, estudos de *trade-off* para apoiar a escolha de soluções de projeto devem permear estas fases [1]-[6]. Para desenvolver um método de apoio aos estudos de *trade-off*, que se proponha a obter

previsões para o LSC de diferentes soluções de projeto, na fase de desenvolvimento, é necessário modelar o cenário de operação e suporte, considerando as características de suportabilidade de cada solução.

Modelos matemáticos baseados nos fatores de confiabilidade, disponibilidade, manutenibilidade e segurança, conhecidos por fatores RAMS (*Reliability, Availability, Maintainability & Safety*), têm sido explorados por pesquisadores para obtenção de previsões, como ferramenta de apoio à tomada de decisões, buscando maximizar níveis de serviço e minimizar custos [3].

Previsões de custos na fase de desenvolvimento de sistemas são essencialmente prospectivas, baseadas em dados estimados. De acordo com guias internacionais que tratam da integração de requisitos de suportabilidade ao produto, o emprego de estimativas em estudos de *trade-off* é aceitável, desde que os dados sejam avaliados e revisados ao longo do desenvolvimento, por meio de análises de sensibilidade [7].

### B. O processo de IPS e a obtenção de estimativas de dados

Para apoiar a obtenção de estimativas de dados, como para os fatores de RAMS, a literatura disponibiliza modelos de integração de requisitos de suporte ao produto, como os propostos por [1], [4] e [6]. Este trabalho apoiou-se no modelo de Suporte Integrado ao Produto, conhecido pela sigla IPS (*Integrated Product Support*), proposto por [1] e composto por doze elementos a seguir nominados:

- 1) Gerenciamento do Suporte ao Produto;
- 2) Engenharia de Suporte Continuado;
- 3) Influência no Projeto;
- 4) Suporte de Suprimento;
- 5) Plano e Gerenciamento da Manutenção;
- 6) Embalagem, Manuseio, Estocagem e Transporte;
- 7) Dados Técnicos;
- 8) Equipamentos de Suporte;
- 9) Treinamento e Suporte de Treinamento;
- 10) Recursos Humanos e Mão de Obra;
- 11) Instalações e Infraestrutura;
- 12) Recursos Computacionais.

Uma das análises do processo de IPS é a Análise de Tarefa de Manutenção, conhecida como MTA (*Maintenance Task Analysis*), que resulta na descrição detalhada das tarefas de manutenção para cada evento, dividindo-as em subtarefas, definindo o nível de manutenção, as condições para sua execução, os recursos necessários e os tempos estimados. Já a Análise de Confiabilidade propõe-se a obter dados como o tempo médio entre falhas, conhecido pela sigla MTBF (*Mean Time Between Failure*) [7].

### C. Gestão de reparáveis

O reparo de sistemas complexos ocorre pela substituição imediata do item que falhou, visando a reduzir o tempo em que o sistema permanece indisponível para reparo, devido aos altos custos decorrentes deste tempo, conhecidos como *downtime costs* [9]. Este fato resulta na preocupação pela disponibilidade de estoque de itens reparáveis para atender a operação.

A gestão de reparáveis torna-se desafiadora quando o sistema é operado em locais distintos, situação comum no setor de defesa, onde sistemas são operados em diferentes regiões para ampliar o guarnecimento do território. Neste contexto surge o conceito de estoque baseado na prontidão, conhecido por RBS (*Readiness-Based Sparing*), que consiste no emprego

de análises avançadas para definir os níveis e a localização de estoques para maximizar a prontidão do sistema, considerando uma estrutura de suporte multinível, ou multi-escalão, e uma estrutura hierárquica de produto. O objetivo dos modelos de RBS é atingir uma métrica de prontidão, normalmente a disponibilidade operacional ( $D_0$ ), genericamente descrita por (1), com o mínimo investimento [6].

$$D_0 = \frac{\text{Tempo Disponível}}{\text{Tempo Disponível} + \text{Tempo Indisponível}} \quad (1)$$

Neste trabalho será considerado que os componentes do sistema apresentam taxa de falha constante, obedecendo uma distribuição exponencial. Apesar desta premissa sugerir uma simplificação não realista, uma ampla pesquisa de campo realizada na década de 70, junto à companhia aérea *United Airlines*, apontou que a taxa de falha constante foi predominante entre os componentes das aeronaves [8]. Ao considerar-se taxa de falha constante, estudos comprovam que a demanda por componentes seguirá um processo de Poisson [9]. Neste caso, para a otimização do estoque de reparáveis, em atendimento a um nível de serviço, a literatura apresenta modelagens matemáticas, como o METRIC (*Multi-Echelon Technique for Recoverable Item Control*), proposta por [9], que se vale da análise marginal para encontrar soluções ótimas para o estoque de reparáveis.

### D. Estratégia de suporte e alocação de recursos

A estrutura de suporte multi-escalão requer a definição de níveis de manutenção, também denominados de escalões de manutenção. Uma estratégia clássica é dividir as atividades de manutenção em três níveis: organizacional, intermediário e parque de manutenção [4]. Neste contexto, surge outra importante análise do processo de IPS, a Análise de Nível de Reparo, conhecida como LORA (*Level of Repair Analysis*), que leva em consideração requisitos operacionais, de suporte, informações técnicas do produto, custos e outras restrições, com o objetivo de determinar uma solução de manutenção otimizada. Sua abordagem estritamente econômica, conhecida como ELORA é baseada em modelos matemáticos que resultam na decisão ótima sobre o tipo de ação de manutenção que cada componente deve ser submetido, definindo se ele deve ser tratado como reparável ou descartável, além de definir em que escalão as diferentes ações de manutenção devem ocorrer [7]. Esta análise tem sido explorada por trabalhos da área de pesquisa operacional como [9]. A ELORA resulta numa decisão que minimiza o custo de suporte em vida, sem considerar aspectos particulares decorrentes, por exemplo, de políticas comerciais de fabricantes, que podem impor restrições à realização de determinados níveis de reparo, ou ainda decisões estratégicas de políticas de fomento à indústria.

O escopo deste trabalho não aborda a decisão de reparo ou descarte, tratando apenas de componentes reparáveis. A preocupação será a escolha da melhor localização, dentro da estrutura de suporte, para a realização de cada nível de manutenção, o que é denominado de estratégia de suporte, realizando ainda a alocação ótima dos recursos e estoques.

### E. Hipótese do trabalho

A hipótese deste trabalho é que a otimização do suporte de soluções de projeto pode ser empregada com a finalidade de apoiar estudos de *trade-off* na fase de desenvolvimento, para

seleção de soluções, resultando num método estruturado para atender o objetivo do trabalho. Para tanto, será proposta uma otimização simultânea da estratégia de suporte, da localização e dos níveis de estoque e da alocação de recursos.

O método emprega o *software* OPUS10©, que se destina a otimização do suporte à operação de sistemas, permitindo análises de cenários e de soluções de suporte.

Os esforços em termos de modelagem aqui apresentados estão alinhados 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. Maiores detalhes podem ser encontrados em [11].

### F. Fundamentação para a escolha do estudo de caso

O sistema de propulsão de um UAV militar (*Unmanned Aerial Vehicle*) foi escolhido como estudo de caso, inspirado no fato de que o Brasil tem atribuído maior importância ao desenvolvimento de sistemas militares, dada a percepção da relevância do fortalecimento da Base Científica, Tecnológica, Industrial e Logística de Defesa, simplificada pela sigla BID (Base Industrial de Defesa) [12].

Esforços para o desenvolvimento de propulsores nacionais têm sido empreendidos por empresas privadas, pelo Governo e por parcerias público-privadas, a exemplo do Projeto Turborreator de 5000 Newtons (TR-5000), desenvolvido pelo Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE), em parceria com uma empresa nacional. O objetivo é desenvolver um motor turbojato nacional, atendendo aos requisitos de propulsão de aeronaves não tripuladas [13].

Um motor aeronáutico é constituído por unidades básicas e cada uma pode ser afetada por uma infinidade de modos de falha, o que resulta na remoção e envio do motor inteiro para reparo. A alternativa de projeto, que será submetida ao método de estudo de *trade-off*, é o conceito de manutenção modular. O benefício deste conceito deriva da habilidade de se remover e reparar apenas a unidade, ou módulo, onde a falha ocorreu. Os requisitos do conceito de manutenção modular devem ser introduzidos nas fases iniciais do projeto do motor [14].

### III. DESCRIÇÃO DO MÉTODO

O método tem início com a obtenção dos dados que formarão os modelos de cada solução de projeto. O ponto de partida é o Conceito de Operações, conhecido pela sigla CONOPS, que é um documento que descreve as características e o cenário de operação do sistema, do ponto de vista do usuário ou operador [15]. Do CONOPS derivam os requisitos operacionais, os dados de operação, a taxa de utilização, bem como a estrutura de suporte. Os demais dados são obtidos das análises do processo de IPS, especialmente da Análise de Confiabilidade e da MTA, que são organizados na base de dados do processo de análise de suporte logístico conhecida como LSA (*Logistics Support Analysis*), cujos procedimentos são definidos por [7].

É essencial para o método que sejam definidos os níveis de manutenção, bem como realizar a alocação das tarefas de manutenção nestes níveis, considerando os recursos necessários para cada tarefa. Assim, o método fará a distribuição ótima dos níveis de manutenção dentro da estrutura de suporte, resultando na estratégia de suporte ótima.

Para tanto, é necessário informar as alternativas de estratégias a serem avaliadas.

A modelagem das soluções de projeto é realizada no OPUS10© como instâncias distintas, seguindo a arquitetura estruturada de inserção de dados do *software*.

O resultado oferecido pelo *software* é um conjunto de pontos de máxima efetividade de custo para cada solução de projeto, resultante da análise marginal empregada pelo OPUS10©. Cada ponto é uma solução ótima para o nível de serviço, dado o valor de LSC do respectivo ponto. A solução ótima é composta por uma estratégia de suporte, uma localização de estoques e seus níveis, além de uma alocação de recursos. A visualização gráfica é feita por curvas que unem estes pontos, motivo pelo qual é empregado o termo curva de máxima efetividade de custo.

A Fig. 2 resume de forma esquemática e simplificada o método proposto. Na figura é possível observar a possibilidade de sobreposição de parte do LSA para ambas as soluções.

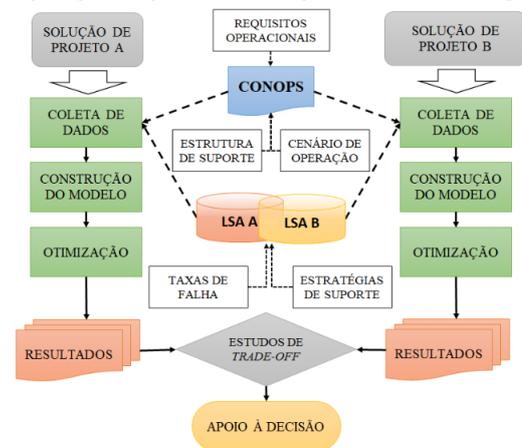


Fig. 2. Resumo esquemático do método.

O método permite ainda realizar análises de custos detalhadas, por meio da divisão do LSC em grupos e subgrupos de custo, possibilitando compreender o comportamento de cada solução de projeto.

Destaca-se a seguir as demais premissas:

- Os itens reparáveis não sofrem condenação.
- Não ocorre canibalização.
- A falha de um item não induz falha nos demais.
- A utilização ocorre de forma uniforme e equalitária.

### A. Aplicação do método ao estudo de caso

O objeto do estudo é o sistema de propulsão de um UAV militar, sendo que os demais sistemas do veículo serão ignorados. As alternativas submetidas ao estudo de *trade-off* referem-se à integração ou não do conceito de manutenção modular ao motor turbojato que compõe o sistema de propulsão. Este sistema será simplificado, sendo formado pelo turbojato e um conjunto de onze acessórios. A falha do sistema ocorre pela falha de seus componentes. As estruturas hierárquicas de produto para ambas as soluções de projeto, não modular e modular, são apresentadas na Fig. 3.

O CONOPS prevê operar por 20 anos uma frota de 36 UAV monomotores, igualmente dividida em duas bases, de acordo com uma taxa de utilização de 25%, com apoio da estrutura de suporte representada na Fig. 4.

A estrutura de suporte do estudo de caso é hipotética, porém, consistente com o que é observado no suporte às frotas

de aeronaves operadas pela Força Aérea Brasileira (FAB). É composta por uma oficina denominada OEM (*Original Equipment Manufacturer*), uma estação central, que representa os parques de material aeronáutico da FAB, e as bases de operação. A estação OEM foi modelada como uma oficina contratada por demanda de serviço. A estação central e as bases são estações que chamaremos de orgânicas.

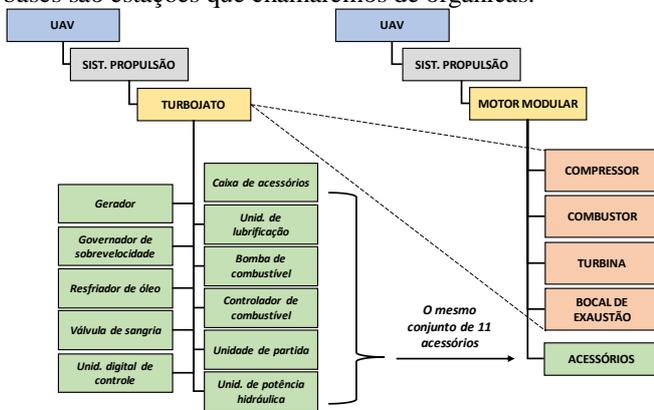


Fig. 3. Estruturas de produto das soluções de projeto.

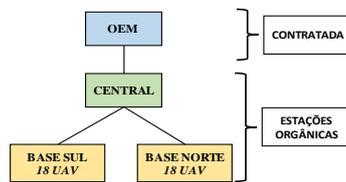


Fig. 4. Estrutura de suporte.

Os níveis de manutenção definidos para o estudo de caso são os apresentados na Tabela I.

TABELA I. NÍVEIS DE MANUTENÇÃO.

Nível	Descrição das atividades/tarefas de manutenção
1	Remoção e troca do sistema de propulsão do UAV.
2	Remoção e troca de um acessório/componente/módulo do motor.
3	Reparo e revisão geral do motor/acessório/módulo do motor.

O UAV não se desloca para as estações central e OEM, resultando na alocação do primeiro nível de manutenção nas bases. Os locais de execução dos demais níveis serão definidos pelo método. As alternativas de estratégia de suporte são apresentadas na Tabela II, onde os números representam os níveis de manutenção atribuídos às estações.

TABELA II. ALTERNATIVAS DE ESTRATÉGIA DE SUPORTE.

Estações	Estratégia de Suporte (ES)				
	ES 1	ES 2	ES 3	ES 4	ES 5
OEM	2, 3	3			3
Central		2	2, 3	3	
Bases	1	1	1	1, 2	1, 2

A atribuição de um nível de manutenção a uma estação, leva em consideração a alocação dos recursos necessários para o dado nível. Para tanto, foram modelados recursos hipotéticos, porém consistentes com o que é observado no suporte às aeronaves da FAB. Os recursos considerados para cada nível de manutenção foram: certificação e recertificação da estação, treinamento, publicações técnicas e atualizações, ferramentas e equipamentos de suporte, bem como a manutenção destes recursos, além dos custos para manter a mão de obra de cada nível de manutenção alocada à estação.

A modelagem das soluções de projeto levou em consideração observações oriundas da prática de suporte à

motores operados pela FAB, de onde constatou-se que, para motores modulares, nem todos os módulos requerem grandes inspeções programadas. Além disso, notou-se que é comum que os intervalos entre estas inspeções sejam diferentes entre os módulos de um motor. Buscando introduzir essa realidade, foi modelado, para o turbojato não modular, uma inspeção de terceiro nível de manutenção, denominada de revisão geral. Para o motor modular atribuiu-se a mesma tarefa para três de seus quatro módulos, sendo que um destes possui um intervalo entre as manutenções preventivas 40% maior que os demais. Outras distinções modeladas estão resumidas na Tabela III.

Por fim, foi definido, para comparação do estudo de *trade-off*, o nível de serviço de 90% de disponibilidade operacional, que reflete um requisito operacional oriundo do CONOPS. Portanto, para as análises comparativas, será considerado o ponto de cada curva mais próximo deste nível de serviço.

TABELA III. DISTINÇÕES MODELADAS.

DESCRIÇÃO DO PARÂMETRO	%	OBSERVAÇÕES
Custo unitário do motor modular em relação ao não modular.	+ 20 %	Introdução da capacidade de separação de módulos em nível intermediário e intercambialidade.
TAT* de reparo ou revisão geral de um módulo em relação ao turbojato.	- 25 %	Decorrente do módulo requerer menos tempo total do serviço que o motor completo.
Quantidade aproximada de H-h** de reparo ou revisão geral de um módulo em relação ao turbojato.	- 40 %	Decorrente do módulo requerer menor emprego de H-h** para o serviço que o motor completo.
Custo do H-h** do OEM em relação às estações orgânicas.	+ 23 %	Oficina especializada contratada por demanda de serviço.
Investimento em recursos de nível 2 para o motor modular em relação ao turbojato (estações orgânicas).	+ 280 %	Acréscimo em feramental (substituição de módulos em nível intermediário), certificação, treinamento e publicações
Investimento em recursos de nível 3 para o motor modular em relação ao turbojato (estações orgânicas).	+ 10 %	Acréscimo em feramental (substituição de módulos no terceiro nível***), certificação, treinamento e publicações técnicas.
Atraso administrativo (fração do TAT*) das bases em relação à estação central e ao OEM.	- 10 %	Assumido maior agilidade nas bases (menor tempo de preparação, despachos, controles, etc). Não atende outras demandas.

\* TAT: Tempo do inglês (*Turn-Around Time*) que reflete o tempo que um componente enviado para reparo, ou revisão geral, leva para voltar a estar disponível.

\*\* H-h: Homem-hora.

\*\*\* O feramental do terceiro nível tem valor absoluto expressivo para as duas soluções de projeto, por considerar um banco de ensaios de motor. Isso explica a variação percentual baixa em relação à variação observada para o segundo nível de manutenção.

Os dados do estudo de caso estão disponíveis online, no endereço <https://www.aerologlab.ita.br/datafiles.html>.

#### IV. ANÁLISES E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

As comparações de custo não consideram inflação e depreciação, e são apresentadas em percentuais, fornecendo o senso de escala, sem referência à unidade monetária. O custo de aquisição da frota de UAV não foi considerado no LSC.

A Fig. 5 apresenta as curvas de máxima efetividade de custo comparando o modelo do motor não modular e o do motor modular. O método permitiu constatar que, para os pontos mais próximos de 90% de disponibilidade operacional, o LSC do motor modular é aproximadamente 5,5% menor em relação ao do motor não modular. O método recomendou estratégias de suporte distintas, sendo a ES 4 para o motor não modular, e a ES 5 para o modular. Nota-se que, para um LSC em torno de \$266.500.000, obtém-se um ganho de aproximadamente 7,1% em disponibilidade operacional com a solução modular. No entanto, o comportamento das curvas aponta para uma diminuição deste ganho conforme as curvas convergem assintoticamente para um mesmo valor de disponibilidade operacional, em torno de 95%, que reflete um

valor a partir do qual acréscimos de investimentos não refletirão em ganhos em disponibilidade, dado que os eventos de indisponibilidade não são revertidos de forma instantânea, por mais eficiente que seja o suporte logístico.

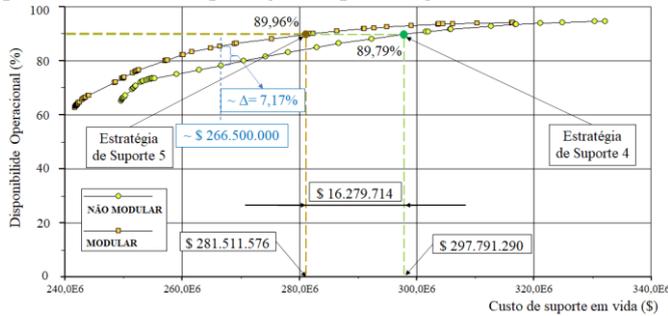


Fig. 5. Comparação das soluções. Adaptado dos resultados do OPUS10©.

O método permite dividir o LSC em grupos e subgrupos, possibilitando uma análise comparativa do comportamento destas parcelas de custo entre as soluções de projeto. A Tabela IV apresenta um agrupamento de formadores do LSC, comparando os custos da solução modular em relação aos da não modular, apresentando o resultado como um percentual. As duas últimas colunas demonstram a variação da proporção das parcelas de custo de acordo com a solução de projeto.

TABELA IV. PRINCIPAIS GRUPOS DE CUSTO DE SUPORTE. ADAPTADA DOS RESULTADOS DO OPUS10©.

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

No caso estudado, a solução modular apresenta expressiva redução, de 82,2%, em aquisição de recursos. Essa redução se deve à estratégia de suporte recomendada pelo método para a solução modular, na qual o terceiro nível de manutenção foi alocado na estação OEM, modelada como uma oficina contratada por demanda de serviço, de forma que os custos de aquisição, manutenção e atualização dos recursos, deste nível de manutenção, não contribuem para formar o LSC.

Destaca-se a redução de 21,9% nos custos de aquisição de estoque de reparáveis ou estoque de giro. Para o caso estudado, atribui-se esta redução ao fato de que, na solução não modular, a otimização do estoque estabelece a aquisição de oito turbojatos para compor o estoque de giro, enquanto para a solução modular este estoque é composto pelas seguintes quantidades de módulos: três do compressor, quatro do combustível, cinco da turbina e cinco do bocal de exaustão.

A redução de 4,1% no custo com manutenção corretiva, apresentada pela solução modular, se deve ao fato do reparo de um módulo requerer menor quantidade de homem-hora no terceiro nível de manutenção. Tendo em vista que esta redução não é expressiva, buscou-se investigar com mais detalhes esse grupo de custo, resultando em duas explicações. A primeira explicação se relaciona a estratégia de suporte recomendada pelo método, onde o terceiro nível de manutenção foi alocado para a estação OEM, onde o custo do homem-hora é 23% maior em relação às estações orgânicas. A segunda explicação está no fato de que, apesar de haver uma redução no emprego

de mão de obra para o terceiro nível de manutenção, há um aumento do emprego no segundo nível, devido a necessidade de desmontagem e substituição dos módulos do motor.

A manutenção preventiva figurou como uma desvantagem para o motor modular. Ressalta-se que a modelagem adotada para o motor modular, com módulos apresentando distintos intervalos entre manutenções preventivas, resultou num aumento da frequência de eventos programados, que também resultou num aumento no custo deste subgrupo e nos custos das operações de transporte.

Ressalta-se que, no modelo adotado no estudo de caso, cada módulo requer, para seu reparo ou revisão geral, uma quantidade de homem-hora 40% menor em relação ao reparo ou revisão geral do turbojato, e não apenas 25% desta quantidade, que seria a proporção direta da divisão do motor em quatro módulos. Isso ocorre devido as atividades que são dispendiosas e que não variam numa proporção direta com tamanho ou complexidade do componente, como testes, inspeção final, preservação e registros de manutenção.

Destaca-se o efeito de maior sobrecarga no primeiro e no segundo nível de manutenção. A proporção da quantidade de homem-hora anual empregada na manutenção preventiva do motor não modular para o primeiro, segundo e terceiro nível de manutenção é de, respectivamente, 11,2%, 3% e 85,8%. Para o motor modular a proporção é, na mesma sequência, de 15,3%, 10% e 74,7%.

Embora o caso tenha seus alicerces nas observações oriundas do suporte à motores operados pela FAB, trata-se de um caso hipotético. O objetivo foi aplicar o método proposto, visando avaliar seu potencial de comparar soluções de projeto, levando em consideração seus aspectos de suportabilidade e a estrutura de suporte.

Para demonstrar a relevância da otimização da estratégia de suporte, foi realizado um experimento no qual comparou-se as duas curvas apresentadas na Fig. 6. A primeira curva, denominada “MODULAR-LORA” é resultante da otimização simultânea da estratégia de suporte, da alocação de recursos e da localização e dos níveis de estoque para um motor modular. A segunda curva, denominada “MODULAR-ES2”, refere-se a um modelo para o mesmo motor modular, porém é resultante da otimização apenas da localização e dos níveis de estoque, sujeito à predefinição da estratégia de suporte 2 da Tabela II.

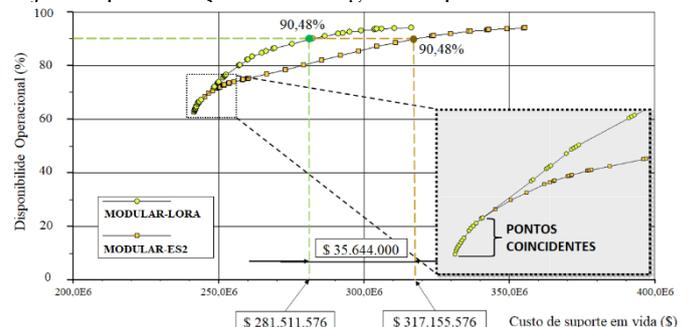


Fig. 6. Impacto da otimização da estratégia de suporte. Adaptado dos resultados do OPUS10©.

Observa-se que, para a mesma solução de projeto, a otimização simultânea proposta pelo método resultou numa redução de aproximadamente 11,2% do LSC, para 90% de disponibilidade operacional, em relação a otimização apenas da localização e dos níveis de estoque, que considera uma estratégia de suporte e uma alocação de recursos pré-definida. Notou-se que os primeiros quatorze pontos de ambas as curvas

são coincidentes, significando que a estratégia de suporte 2 é ótima para estes pontos iniciais. No entanto, a partir do décimo quinto ponto de cada curva, há um descolamento destas, decorrente da mudança da estratégia de suporte ótima.

Ao observar o comportamento da curva dos cenários otimizados pelo método proposto, notou-se que a estratégia de suporte é sensível ao nível de serviço. A partir desta observação, decidiu-se submeter o método a outro experimento, realizado aplicando-se o método a instâncias que consideram a distribuição equalitária dos 36 UAV para duas, quatro e seis bases. O resultado é apresentado em forma de tabela, pois a quantidade de curvas e a proximidade destas dificulta a apresentação gráfica. A Tabela V apresenta a alternância entre as estratégias de suporte resultante da aplicação do método, ao longo de cada curva, indicando os valores de disponibilidade operacional e LSC dos pontos de fronteira entre uma estratégia de suporte e outra.

TABELA V. ALTERNÂNCIA DA ESTRATÉGIA DE SUPORTE ÓTIMA. ADAPTADA DOS RESULTADOS DO OPUS10©.

		ESTRATÉGIA DE SUPORTE (ES)				
		ES 1	ES 2	ES 3	ES 4	ES 5
2 BASES	NÃO MODULAR	Disp. Op. (%)		65,1 - 67,2	69,5 - 94,6	
		LSC (\$)		249,5 - 250,3	251,4 - 332,2	
2 BASES	MODULAR	Disp. Op. (%)	62,7 - 67,3			72,2 - 94,2
		LSC (\$)	241,7 - 244,1			248,6 - 316,3
4 BASES	NÃO MODULAR	Disp. Op. (%)		65,2 - 68,4	70,7 - 94,4	
		LSC (\$)		250,2 - 251,7	254,2 - 347,3	
4 BASES	MODULAR	Disp. Op. (%)	62,8 - 72,2			79,1 - 93,8
		LSC (\$)	242,3 - 251,0			263,2 - 333,0
6 BASES	NÃO MODULAR	Disp. Op. (%)		65,2 - 68,4	71,5 - 94,0	
		LSC (\$)		251,3 - 252,8	258,0 - 353,0	
6 BASES	MODULAR	Disp. Op. (%)	62,8 - 73,6			80,3 - 93,4
		LSC (\$)	243,4 - 255,4			272,7 - 350,4

Neste experimento observou-se que o método alterna da estratégia de suporte 3 para a 4 nas instâncias do motor não modular, e da estratégia 2 para a 5, para as instâncias do motor modular, de acordo com o aumento do nível de serviço. Isso aponta para a tendência de que, para obtenção de maior desempenho no suporte logístico, é necessário trazer os níveis de manutenção para próximo dos locais de operação do sistema, visto resultar em redução no TAT dos itens. Esta observação explica o fato de o método não ter indicado como ótima a estratégia de suporte 1 para nenhuma das instâncias, dado que nesta estratégia os níveis 2 e 3 de manutenção estão distantes dos locais de operação.

Apesar das potencialidades da ferramenta OPUS10©, ressalta-se que os resultados são baseados em um modelo estático, cujos eventos são uniformemente distribuídos. O método é passível de aprimoramento com a inserção de variáveis com dependência temporal e simulação de cenários operacionais. O estudo apresentado faz parte do desenvolvimento de um trabalho de mestrado, sendo que o aprimoramento deste método é parte dos desafios futuros de pesquisa.

## V. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou um método para apoiar estudos de *trade-off* envolvidos em decisões de projeto, na fase de desenvolvimento, com base no reflexo de soluções de projeto no custo do ciclo de vida, por meio da modelagem dos aspectos de suportabilidade e empregando otimização simultânea da estratégia de suporte, da alocação de recursos, da localização de estoques e de seus níveis, para obter o LSC de cada solução, permitindo comparações detalhadas.

O estudo de caso demonstrou a potencialidade das análises que o método permite conduzir, possibilitando avaliar as

vantagens e desvantagens de cada solução de projeto, em termos da composição do LSC, uma das parcelas mais significativas do custo do ciclo de vida de um sistema.

O método também evidenciou a relevância de se considerar a estratégia de suporte nos estudos de *trade-off*, demonstrando a possibilidade de obtenção de ganhos de efetividade no suporte. O estudo revelou que a estratégia de suporte ótima é sensível ao nível de serviço requerido, apontando que os pontos de fronteira, onde se alterna a recomendação do método de uma estratégia para outra, devem ser avaliados com maior rigor, sugerindo-se o emprego de análises de sensibilidade.

Maior credibilidade poderá ser atribuída ao método ao aprimorá-lo por meio da exploração de técnicas de simulação, agregando ao modelo o dinamismo da operação, sendo este aprimoramento um desafio futuro de pesquisa.

## AGRADECIMENTOS

Os autores deste artigo agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à empresa sueca Systecon Group AB pelo suporte fornecido durante o desenvolvimento deste trabalho.

## REFERÊNCIAS

- [1] AeroSpace and Defense Industries Association of Europe and Aerospace Industries Association, "SX000i – International specification for Integrated Product Support (IPS)", Issue n. 3.0, 2021. [Online]. Disponível em: [www.sx000i.org](http://www.sx000i.org). [Acesso em 12/12/2021].
- [2] Defense Acquisition University, "System Engineering Guidebook", 2022. [Online]. Disponível em: [www.dau.edu](http://www.dau.edu). [Acesso em 17/06/2022].
- [3] D. G. Figueiredo-Pinto, F. T. M. Abrahão, "Custo do ciclo de vida: proposta de método de cálculo prospectivo e análise de sensibilidade a fatores de confiabilidade e manutenibilidade", em XX Simpósio de Aplicações Operacionais em Áreas de Defesa (SIGE), Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, SP, 2018.
- [4] B. S. Blanchard, Logistics Engineering & Management, Harlow: Person Education Limited, 2014.
- [5] Council of Engineering Professionals, "About us", 2022. [Online]. Disponível em: [logisticsengineers.org](http://logisticsengineers.org). [Acesso em 20/06/2022].
- [6] Defense Acquisition University, "Integrated Product Support Element Guidebook", 2011. [Online]. Disponível em: [www.dau.edu](http://www.dau.edu). [Acesso em 24/04/2022].
- [7] AeroSpace and Defense Industries Association of Europe and Aerospace Industries Association, "S3000L – International procedure specification for Logistics Support Analysis (LSA)", Issue n. 2.0, 2021. [Online]. Disponível em: [www.sx000i.org](http://www.sx000i.org). [Acesso em 21/04/2022].
- [8] F. S. Nowlan e H. F. Heap, "Reliability-Centered Maintenance," United Airlines, San Francisco, 1978.
- [9] C. C. Sherbrooke, "Optimal inventory modeling of systems: multi-echelon techniques", New York: Kluwer Academic Publishers, 2004.
- [10] R. J. I. Basten, M. C. van der Heijden, J. M. J. Schutten, "Practical extensions to a minimum cost flow model for level of repair analysis", European Journal of Operational Research, no. 2, vol. 211, p. 333-342, junho 2011.
- [11] T. C. de Oliveira, "Design of a tool for the Integrated Logistics Support development of aerospace complex systems: Embryo Digital Twin, dissertação de mestrado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, SP, 2022.
- [12] M. B. da Cunha, J. C. A. do Amarante, "O livro branco e a base científica, tecnológica, industrial e logística de defesa", Revista da Escola de Guerra Naval, no. 1, vol. 17, p. 11-32, janeiro/junho 2011.
- [13] Instituto de Aeronáutica e Espaço, "Relatório de atividades 2018", São José dos Campos, março 2019. [Online]. Disponível em: [www.iae.cta.br](http://www.iae.cta.br). [Acesso em 10/05/2021].
- [14] D. B. Edmuds, "Modular engine maintenance concept considerations for aircraft turbine engines", Aircraft Engineering and Aerospace Technology, no. 1, vol. 50, p. 14-17, janeiro 1978.
- [15] IEEE-SA Standard Board "EEE Std 1362-1998: IEEE Guide for Information Technology – System Definition – Concept of Operations (ConOps) Document", 1998.