



Análise Operacional e Engenharia Logística: Engenharia Logística

Custo do Ciclo de Vida: Proposta de Método de Cálculo Prospectivo e Análise de Sensibilidade a Fatores de Confiabilidade e Manutenibilidade

Life Cycle Cost: Proposal for a Prospective Calculation Method and Sensitivity Analysis to Reliability and Maintainability Factors

Danilo Garcia Figueiredo Pinto¹, Fernando Teixeira Mendes Abrahão¹¹Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos/SP – Brasil

Article Info

Article History:

Received	12	March	2023
Revised	20	May	2023
Accepted	16	August	2023
Available online	22	September	2023

Palavras Chave:

**Engenharia Logística,
Custo do Ciclo de Vida
Custo da Hora de Voo**

Keywords:

**Logistics Engineering,
Life Cycle Cost
Flight Time Cost**

E-mail addresses:

danioldf@ita.br (D.G. Figueiredo Pinto);
abrahao@ita.br. (F.T.M. Abrahão).

Resumo

A previsão de custos de ciclo de vida de sistemas complexos de Defesa para fins de planejamento operacional e logístico é uma atividade cada vez mais crítica frente às constantes e crescentes pressões por redução orçamentária. A incerteza envolvida nos cálculos é um desafio que se vê agravado em novos projetos, dada a inexistência de dados históricos para sustentarem as estimativas. Diante disso, este artigo propõe um método de cálculo prospectivo do Custo do Ciclo de Vida e do Custo por Hora de Voo a partir de uma abordagem baseada na compilação de custos inerentes a processos elementares de suporte, por meio de modelagem e simulação do sistema alvo, com a ajuda da suite OPUS©. Para ilustrar a aplicação do método, foi montado um estudo de caso inspirado em um projeto da Força Aérea Brasileira, que também ensejou uma análise de sensibilidade dos custos de vida a fatores de Confiabilidade e Manutenibilidade.

Abstract

The life cycle cost forecasting of complex Defense systems for operational and logistical planning purposes is an increasingly critical activity in the face of constant and growing pressures for budget reduction. The uncertainty involved in the calculations is a challenge that is further aggravated in new projects, given the lack of historical data to support the estimates. In view of this, this article proposes a prospective calculation method for Life Cycle Cost and Cost per Flight Hour based on an approach that compiles costs inherent to elementary support processes, through modeling and simulation of the target system, with the help of the OPUS© suite. To illustrate the application of the method, a case study was assembled inspired by a project of the Brazilian Air Force, which also led to a sensitivity analysis of life costs to factors of Reliability and Maintainability.

I. INTRODUÇÃO

Métodos de otimização de processos logísticos estão sendo constantemente pesquisados, propostos e testados na busca incessante por garantir a suportabilidade e a viabilidade financeira (*affordability*) de sistemas complexos de Defesa, os quais são dotados de tecnologias cada vez mais avançadas e de alto valor agregado. Não obstante, é importante pontuar que tais sistemas hoje em dia estão inseridos e devem ser projetados para operar em cenários extremamente dinâmicos, envolvendo inclusive conflitos não convencionais, em que ameaças de escala global estão em contínua evolução e a obsolescência é um risco permanente.

Um tema essencial e recorrente em grande parte desses esforços de pesquisa é a previsão dos custos de ciclo de vida. No caso específico de aeronaves militares, o desafio estocástico trazido pela incerteza natural que permeia os processos logísticos é agravado pela necessidade de projeção das estimativas dos seus custos para horizontes distantes, que podem superar a marca de três décadas e contemplar atualizações ou melhorias (*upgrades*) incrementais, ou modernizações de meia-vida.

Em particular no Comando da Aeronáutica, a conjuntura atual de renovação de frotas de grande relevância, com a iminente entrada em serviço do KC-390 e o Gripen NG em franco desenvolvimento, reveste este problema de especial importância, pois os métodos atualmente utilizados para o custeio da hora de voo e do ciclo de vida são fundamentados em abordagens retrospectivas que dependem de dados históricos de operação, o que restringe a sua aplicação efetiva a novos projetos que ainda não entraram em serviço, ou cuja operação muito incipiente ainda não oferece base de dados estatisticamente significativa ou suficientemente sólida.

Com base nesse contexto, este trabalho busca desenvolver, implementar e testar um método de cálculo prospectivo do Custo de Ciclo de Vida (CCV) e do Custo por Hora de Voo (CHV), com base na elaboração de um modelo computacional dinâmico capaz de identificar e captar dados dos mais elementares eventos geradores de custos logísticos, com o objetivo de consolidá-los para produzir resultados consistentes e confiáveis em nível sistêmico.

Diante das metas definidas acima, esta pesquisa parte de uma revisão literária sobre os conceitos basilares do assunto em pauta, delineada no próximo capítulo, e em seguida estabelece uma abordagem metodológica coerente com os

objetivos traçados, a qual é empregada de forma a garantir o rigor científico dos resultados apresentados. O texto segue com a análise e interpretação dos dados obtidos, finalizando com as conclusões e recomendações fomentadas pelo estudo.

II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O estudo ora apresentado se guiou pelas obras constantes de [1] e [2], as quais propõem um modelo de Suporte Logístico Integrado para sistemas complexos que é composto por doze diferentes elementos, os quais devem operar de maneira coesa, harmônica e sinérgica a fim de garantir a suportabilidade do projeto de maneira custo-efetiva por todo o seu ciclo de vida.

Em complemento, também foram de fundamental importância para garantir a correta implementação dos vários processos associados aos diferentes elementos, o detalhamento sobre os mesmos oferecido por [3] e a perspectiva diferenciada apresentada por [4]. Os conceitos básicos delineados por essas obras foram refletidos na formulação do modelo básico de sistema de suporte logístico que sustenta todo o desenvolvimento deste texto.

Além disso, é necessário destacar que, segundo [3], os requisitos logísticos para o alcance das metas de suportabilidade devem ser perseguidos desde as fases iniciais de concepção do sistema. A Fig. 1, proposta por [2], corrobora essa visão mostrando que a oportunidade para geração de economia no custo de ciclo de vida de um produto se concentra nas suas etapas iniciais, e é possível perceber que este potencial já é significativamente reduzido a partir do momento em que os primeiros equipamentos começam a ser produzidos.

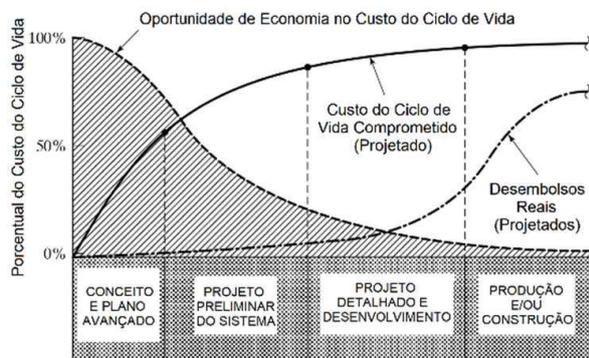


Fig. 1. Oportunidade de Economia do Custo de Ciclo de Vida.

De fato, as decisões mais críticas e com maior impacto sobre a suportabilidade do equipamento são tomadas já no princípio de sua existência devido à necessidade imposta pelas atividades de projetistas e desenvolvedores. No entanto, cada decisão adotada significa uma oportunidade passada, que pode ter sido bem aproveitada ou não, o que em qualquer dos casos reduz as possibilidades futuras pela prevalência e eventual imutabilidade técnica ou econômica da definição adotada.

Neste ponto, é importante observar que tais decisões ocorrem em um ambiente sujeito a elevados graus de incerteza, agravados pelos longos ciclos de vida característicos de sistemas complexos, que podem operar de forma estendida em relação ao planejamento inicial, como é o caso das aeronaves militares Northrop Grumman F-5 e o Lockheed C-130 Hércules da Força Aérea Brasileira (FAB). A projeção de custos logísticos sobre um horizonte tão

distante, a partir da fase de concepção, resulta na potencialização da variabilidade natural associada a qualquer processo, de forma que pequenos erros associados a incertezas existentes no momento da decisão podem resultar em grandes prejuízos acumulados ao fim da vida útil do sistema apoiado.

Em razão disso, modelos matemáticos para previsão das demandas e custos logísticos são largamente estudados por cientistas como ferramentas de apoio à decisão na busca pela maximização dos níveis de serviço entregues, com a concomitante minimização dos custos incorridos. O custeio pelo método de Engenharia de Projetos é o mais preciso de acordo com [5], embora seja reconhecidamente mais complexo e mais demorado. Este trabalho aplicou o referido método utilizando-se dos fatores RAMS (do inglês *Reliability, Availability, Maintainability & Safety*, ou Confiabilidade, Disponibilidade, Manutenibilidade e Segurança), para estimar os eventos básicos geradores de custos, e então proceder à sua consolidação com a ajuda de recursos computacionais. Nesse interim, deve ser ressaltado que o presente estudo considera que os requisitos de Disponibilidade e Segurança são dados do problema e não podem ser flexibilizados, sendo funções dependentes dos demais fatores.

Quanto aos dados de Confiabilidade, no campo da aviação, vale notar que a vasta maioria dos modelos prospectivos, ou seja, que buscam estimar os custos logísticos sem recorrer a histórico de dados, assume taxa de falha constante, significando confiabilidade exponencial e, por conseguinte, que a demanda por itens segue um processo de Poisson [6]. De acordo com [7] as premissas são válidas, pois a taxa de falha constante foi o comportamento mais recorrente na ampla pesquisa de campo realizada pelos autores junto a companhias aéreas, em especial a patrocinadora do estudo, *United Airlines*.

Além disso, [2] sustenta que essa simplificação é aplicável também para itens que são acometidos por falhas prematuras ou por desgaste, se considerada apenas a sua fase madura da operação, que tende a ser a mais relevante do ciclo de vida, em função do processo de eliminação (*Burn-In*) de falhas infantis efetuado pelos fabricantes, e das tarefas de manutenção preventiva que buscam evitar as falhas por desgaste.

Em contrapartida, a despeito do comportamento das taxas de falha e das demandas dos diferentes itens, é sabido que mesmo os valores médios nominais, como é o caso do conhecido MTBF (do inglês *Mean Time Between Failures*), oferecidos pelos OEMs (do inglês *Original Equipment Manufacturers*), com base em testes realizados em laboratório, dificilmente são verificados na prática. Referência [8] credita uma parte deste erro à falta de maturidade dos dados no momento da entrada em serviço das primeiras aeronaves de uma frota. Já [9] também reconhece a existência da divergência e propõe fatores de correção, por tipo de plataforma e sistema, para converter dados nominais de confiabilidade em dados operacionais.

Por outro lado, os parâmetros associados às métricas de manutenibilidade sofrem com a contínua expansão da cadeia de suprimentos, e convivem com os riscos de atrasos e interrupções trazidos pela dimensão global das redes de fornecedores que trabalham no suporte aos modernos sistemas militares. Dessa forma, atrasos substanciais frente

aos tempos planejados são recorrentes, o que traz desafios significativos ao estabelecimento de prazos contratuais para fornecimento e reparo de itens. Por um lado, as dificuldades administrativas e logísticas pedem a elevação dos prazos, por outro os clientes pressionam para que o circuito de suporte opere de forma cada vez mais ágil. Com isso, em termos contratuais os limites são definidos como resultado de um processo de negociação subjetiva, que carece de maior entendimento sobre os custos e benefícios relacionados à expansão ou contração dos tempos associados à manutenibilidade.

Há que se acrescentar ainda que uma métrica comumente utilizada para planejamento, comparação e controle de custos por órgãos de Defesa de vários países é o chamado Custo por Hora de Voo [10]. Em geral, esta métrica é associada à fase de Operação e Suporte do Sistema, pois possui relação direta e varia com o esforço operacional desempenhado, razão pela qual o Comando da Aeronáutica denota este termo como Custo Logístico da Hora de Voo (CLHV) [11]. No entanto, o método de cálculo empregado pelo COMAER é retrospectivo, ou seja, os valores de CLHV são derivados a partir de médias obtidas com base em dados históricos de operação, motivo pelo qual não é possível a sua aplicação para estimativa de custos de novos projetos que ainda estão por entrar em serviço.

Face ao exposto, e com base nas referências até aqui elencadas, este artigo propõe um método para a estimativa do CCV e do CHV de forma prospectiva, valendo-se de dados representativos, porém descaracterizados, de um projeto da FAB. Para tanto, recorreu-se ao auxílio de ferramentas computacionais na modelagem e simulação do sistema logístico em comento, conforme delineado na próxima seção. Neste ínterim, deve ser mencionado que o software OPUS10©, utilizado no cálculo do estoque otimizado que deve ser adquirido em atendimento ao nível de serviço requerido, segue um algoritmo baseado na técnica conhecida como METRIC (*Multi-Echelon Technique for Recoverable Item Control*) formulada por [6] em seu artigo seminal de 1978. Dessa forma, todas as premissas e condições de contorno impostas pela referida técnica também balizam a modelagem em pauta, tais como a não existência de condenação ou de canibalização na frota.

III. METODOLOGIA

A metodologia proposta pelo autor para o cálculo dos custos do ciclo vida de forma prospectiva consiste na adoção de uma abordagem “de baixo para cima” (*bottom-up*), derivada da conhecida técnica de estimativa de custos de Engenharia de Projetos, para compilação de custo básicos relacionados a eventos singulares da provisão de suporte logístico a um sistema complexo. Essa técnica é reconhecidamente mais precisa [5], porém requer modelagem precisa e carece da utilização de meios computacionais eficientes em razão da sua complexidade, profundidade e abrangência.

Dessa forma, lançou-se mão de um pacote de software de gerenciamento de ciclo de vida chamado Suíte OPUS© da empresa sueca Systecon AB, cuja licença acadêmica está disponível no Laboratório de Engenharia Logística do ITA (AeroLogLab). Para fins de análise dos resultados e

potencialidades do modelo desenvolvido, um estudo de caso foi montado.

Com isso, a metodologia ora empregada tem início com a modelagem em OPUS10© de um sistema de suporte logístico hipotético inspirado em um cenário real, cujos dados foram descaracterizados por serem de caráter sigiloso. Essa modelagem inicial é uma modelagem matemática estática e determinística, que assume taxas de falha constantes e visa a otimizar o desempenho do sistema escolhendo a melhor combinação de estoques para suportar a operação, segundo diferentes valores de orçamento. Para tanto, foram considerados de forma realista apenas os valores médios de cada parâmetro utilizado, o que equivale ao alcançável na prática, sem considerar medidas de dispersão ou tipos de distribuição de probabilidade associados.

O resultado oferecido por este primeiro programa é, portanto, uma curva de máxima efetividade de custo em que todos os pontos representam soluções ótimas de composição de estoques para cada nível de orçamento. Foi adotada como requisito para o sistema em análise a disponibilidade de 90%, de modo que em todas as instâncias avaliadas sempre foi selecionado o ponto mais próximo deste nível de desempenho. A este ponto corresponde uma lista de material específica, que deve ser obtida para atingir o nível de serviço desejado. Esta lista foi então considerada adquirida e incorporada ao modelo na execução dos próximos passos.

Em seguida, o modelo foi submetido à simulação no programa SIMLOX©, que trouxe dinamismo à análise através da inserção de variáveis dependentes do tempo, como perfis operacionais por exemplo. Esta ferramenta permite compreender melhor o comportamento do sistema ao longo da sua utilização, identificando gargalos, avaliando cenários, testando possíveis soluções e verificando eventuais problemas pontuais que possam surgir em momentos específicos do ciclo de vida, e não são evidenciados por modelos estáticos. Foram rodadas 100 replicações de cada cenário a fim de conferir maior robustez aos resultados.

Na sequência o modelo construído e os resultados obtidos anteriormente foram carregados em um terceiro programa da suíte chamado CATLOC©, responsável pelo cômputo dos custos. Nesta etapa, todos os eventos ocorridos no período de operação simulado foram precificados e integrados no domínio do tempo, do espaço (diferentes estações), das missões realizadas e dos materiais componentes do sistema a fim de compor “de baixo para cima” os custos do ciclo de vida.

Ao final, os resultados apresentados foram submetidos a uma análise de sensibilidade a variações em fatores de confiabilidade, no caso as taxas de falha dos itens, e de manutenibilidade, quais sejam os tempos envolvidos no período em que o equipamento está indisponível, cuja composição é conhecida pelo termo em inglês *downtime* [2].

Tal análise foi procedida em função do fato de que os dados de entrada do modelo de previsão são permeados por incerteza e, portanto, faz-se necessário verificar o impacto que a variabilidade dos diversos fatores pode trazer sobre a estimativa original. Além disso, o modelo deve mostrar-se capaz de acompanhar o sistema em vida, sendo dinâmico para assimilar as alterações observadas ao longo da sua operação.

Cumprido ressaltar que, embora todo modelo seja por natureza uma simplificação da realidade, o nível de

complexidade alcançado pela modelagem proposta foi ainda restrito pelos limites da licença acadêmica da suíte OPUS©.

IV. ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DE DADOS

O caso em estudo foi derivado de um projeto real da FAB, no entanto os dados foram descaracterizados para preservar o predicado ostensivo do texto, e se resumem a apenas 23 itens devido ao limite imposto pela licença de software utilizada. Os itens foram escolhidos com base em uma análise ABC, seguindo o ranking dos componentes mais significativos de acordo com o índice calculado pela fórmula abaixo:

$$IS = FR \times APPF \times QPA \times PREÇO \quad (1)$$

Onde:

IS = Índice de Significância.

FR = Taxa de Falha (*Failure Rate*).

APPF = Fator de Aplicação (*Application Factor*) de acordo com os tipos de missão que demandam a utilização do item.

QPA = Quantidade Por Aeronave.

PREÇO = Valor de aquisição do item.

A Tabela I apresenta os dados básicos dos itens selecionados. Cabe observar que, em razão do critério adotado, itens de consumo não foram contemplados, apenas reparáveis.

TABELA I. DADOS BÁSICOS DOS COMPONENTES DA AERONAVE

Item	Valor (\$)	Taxa de Falha (1/106 HV)	Categoria	Vida Técnica (Anos)
1001	4,695,890.42	166.67	LRU	15
1002	295,894.60	270.86	LRU	15
1003	2,255,123.14	390.63	LRU	15
1004	2,033,460.56	200.00	LRU	15
1005	117,549.11	416.67	LRU	15
1006	3,768,675.49	636.94	LRU	15
1007	474,630.54	818.33	LRU	15
1008	650,828.14	364.30	LRU	15
1009	748,020.61	666.67	LRU	15
1010	476,447.78	291.12	LRU	15
1011	1,885,964.04	555.56	LRU	15
1012	1,285,966.09	62.50	LRU	15
1013	556,557.12	285.71	LRU	15
1014	2,204,079.57	434.78	LRU	15
1015	448,779.15	158.58	LRU	15
1016	1,090,680.93	117.65	LRU	15
1017	1,050,905.46	117.65	LRU	15
1018	170,659.48	306.84	LRU	15
1019	430,605.10	238.10	LRU	15
1020	61,711.15	833.33	LRU	10
1021	30,852.42	833.33	LRU	10
1020-1	56,612.02	416.67	SRU	10
1021-1	27,680.34	416.67	SRU	10

A vida técnica dos componentes diz respeito à sua expectativa de vida útil e foi utilizada nos cálculos como parâmetro de depreciação conforme explicado mais à frente.

A estrutura de suporte logístico por sua vez também foi simplificada, consistindo apenas de uma Base Operacional

(BOP), onde estão lotadas as duas aeronaves que compõem a frota analisada, e de um fornecedor logístico, a Contratada, com autonomia plena para atender o reparo de todos os itens abordados. A Fig. 2 ilustra o sistema, com destaque para os tempos de transporte entre as estações (72 horas no sentido da BOP → Contratada, e 24 horas no sentido inverso).

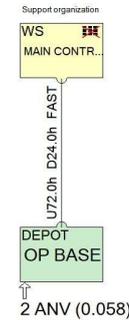


Fig. 2. Estrutura de Suporte Logístico.

Já na Tabela II, podem ser verificados os custos de transporte e de estocagem, que foram estabelecidos, com base em práticas do mercado, como proporcionais ao valor de cada item de modo a refletir questões intrínsecas tais como seguro. A Tabela II também traz a quantidade de homens-hora empregada e o valor do kit de reparo dos itens. O custo do homem-hora de manutenção foi estipulado em \$240 na Contratada e \$100 na Base Operacional. Já o Turn-Around Time (TAT), tempo entre a saída de um item para reparo e seu retorno à BOP, foi firmado de forma geral em 180 dias geral.

TABELA II. CUSTOS DE TRANSPORTE E ARMAZENAGEM

Item	Transporte (\$/trecho)	Estocagem (\$/ano)	HH Reparo (qtde/evento)	Kit Reparo (\$/evento)
1001	24,679.45	70,438.36	180	375,671.23
1002	2,679.47	4,438.42	60	23,671.57
1003	12,475.62	33,826.85	60	180,409.85
1004	11,367.30	30,501.91	120	162,676.84
1005	1,787.75	1,763.24	80	9,403.93
1006	20,043.38	56,530.13	40	301,494.04
1007	3,573.15	7,119.46	20	37,970.44
1008	4,454.14	9,762.42	30	52,066.25
1009	4,940.10	11,220.31	30	59,841.65
1010	3,582.24	7,146.72	40	38,115.82
1011	10,629.82	28,289.46	20	150,877.12
1012	7,629.83	19,289.49	20	102,877.29
1013	3,982.79	8,348.36	20	44,524.57
1014	12,220.40	33,061.19	20	176,326.37
1015	3,443.90	6,731.69	20	35,902.33
1016	6,653.40	16,360.21	30	87,254.47
1017	6,454.53	15,763.58	30	84,072.44
1018	2,053.30	2,559.89	20	13,652.76
1019	3,353.03	6,459.08	20	34,448.41
1020	1,483.06	849.18	40	4,936.89
1021	1,338.40	415.21	40	2,468.19
1020-1	1,508.56	426.23	20	4,528.96
1021-1	1,354.26	416.75	20	2,265.00

O esforço aéreo anual planejado para cumprimento por cada aeronave é de 500 Horas de Voo (HV), e as atividades de manutenção preventiva foram modeladas apenas no nível sistêmico por meio da inclusão de inspeções periódicas a cada 100HV e 500HV com as características descritas na Tabela III.

TABELA III. MANUTENÇÃO PREVENTIVA

Inspeção	HH Inspeção (qtde/evento)	Kit Inspeção (\$/evento)	TAT Inspeção (Dias)
100 HV	40	5,000.00	1
500 HV	1,000	50,000.00	7

Considerando os dois primeiros anos como a fase de entrada em serviço da frota, o cenário acima descrito foi implementado no programa OPUS10© para cálculo da Lista de Aprovisionamento Inicial, ou *Initial Provisioning List* (IPL), que deverá ser adquirida para dar suporte a este período inicial de operação e atender ao requisito operacional de 90% de disponibilidade. Na Fig. 3 a curva de máxima efetividade de custo fornecida pelo programa pode ser observada com destaque para o ponto mais próximo do requisito de 90%.

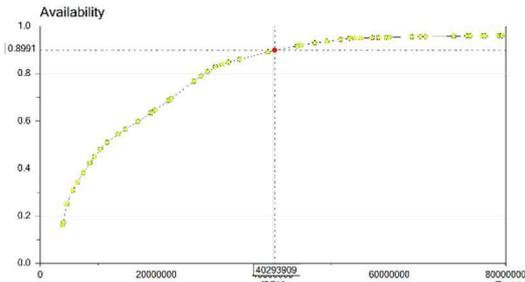


Fig. 3. Curva de Máxima Efetividade de Custo gerada pelo OPUS10.

Utilizando as quantidades de estoque recomendadas no ponto escolhido e o perfil operacional de treinamento com a distribuição de horas de voo mostrada pela Fig. 4, os dois anos iniciais da operação foram simulados com a ajuda do software SIMLOX©. Deve ser enfatizado que o perfil reflete uma maior intensidade de utilização da frota nos nove meses centrais de cada ano, de acordo com o que é esperado em unidades de treinamento.

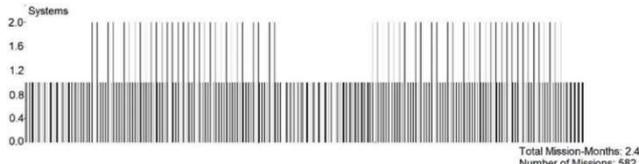


Fig. 4. Perfil Operacional Simulado no SIMLOX.

Com base nos resultados obtidos ao fim de 100 replicações, a simulação acusou uma disponibilidade média de 90.84%, com as variações apresentadas na Fig. 5.

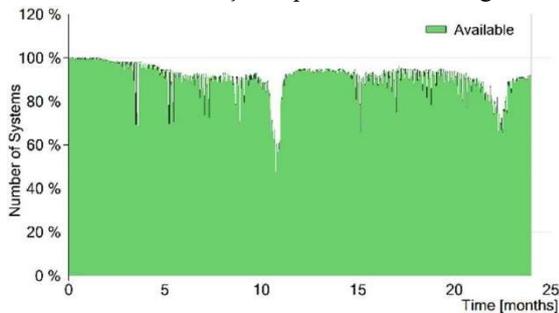


Fig. 5. Variação da Disponibilidade em Função do Tempo.

Em seguida, o modelo elaborado no OPUS10© com os resultados da IPL e da simulação foram carregados no último programa da suíte, o CATLOC©. Este compilou todos os custos incididos em cada evento ocorrido ao longo do cenário simulado, e traçou os custos de suporte de vida

resultantes com grande flexibilidade para apresentação e análise do comportamento dos custos ao longo do tempo, bem como a identificação de elementos direcionadores de custo (Cost Drivers), como ilustrado pelas Fig. 6, Fig. 7 e Fig. 8.

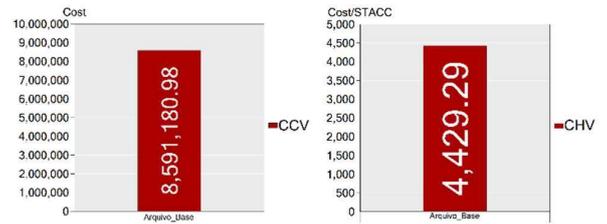


Fig. 6. CCV e CHV usando Depreciação.

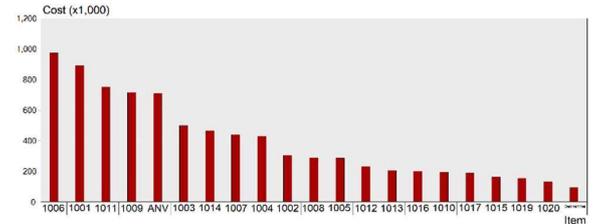


Fig. 7. CCV por Item.

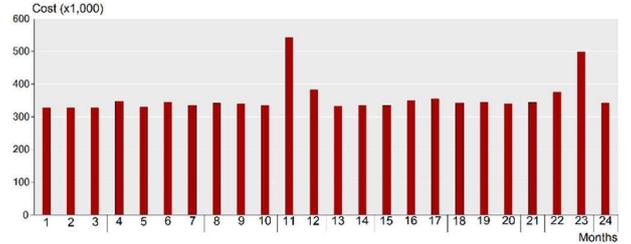


Fig. 8. CCV ao Longo do Tempo.

É importante destacar que o CATLOC oferece duas estruturas de custo diferentes, uma que considera a incidência total do custo (recorrente ou não) no momento em que o fato gerador ocorre, conhecida como *Accrual-Based Accounting* (ABA), e outra que distribui os custos não recorrentes ao longo de todo o período de depreciação previsto para aquele bem. Neste artigo a última abordagem foi adotada, pois está em linha com o Método de Apropriação Uniforme preconizado pelo Comando da Aeronáutica conforme [11]. Além disso, como o período simulado é bastante inferior à vida útil esperada para o sistema e seus componentes, foi considerado que a estrutura ABA penalizaria de forma exacerbada os valores da hora de voo e que, portanto, não seria coerente a sua aplicação ao presente caso.

Por fim, tomando em conta as observações de [8] com respeito à imaturidade de dados de confiabilidade, principalmente durante o período de entrada em serviço, que é o caso ora estudado, os apontamentos de [9] reconhecendo que os dados nominais de confiabilidade via de regra não se verificam na prática, e a incerteza inerente aos tempos envolvidos nos processos logísticos, foram ensaiadas no modelo alterações controladas dos fatores de confiabilidade e manutenibilidade. Vale registrar que a ferramenta empregada conferiu grande flexibilidade e dinamicidade ao modelo, que foi capaz de incorporar as alterações e apresentar os novos resultados para cada cenário em questão de segundos com o uso da tabela *ScaleFactors* do OPUS10©.

Dessa forma, primeiramente, os dados de taxas de falha foram alterados por meio de um fator de escala variando de

50% a 150% em incrementos de 5%. Os efeitos na curva de máxima efetividade de custo (C/E – Cost Effectiveness) podem ser verificados na Fig. 9.

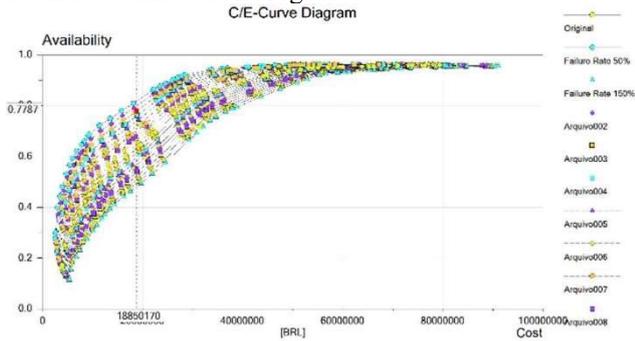


Fig. 9. Sensibilidade da Curva de C/E à Taxa de Falha.

A sensibilidade aos fatores de manutenibilidade também foi avaliada por meio da aplicação dos mesmos fatores de escala aos tempos associados ao período de downtime do sistema, ou seja, o Turn-Around Time de reparo dos itens e do sistema, incluindo os tempos de transporte e as durações das inspeções preventivas. Os impactos sobre a Curva C/E são mostrados na Fig. 10.

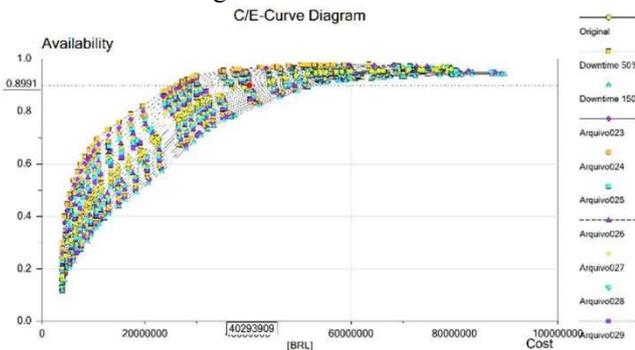


Fig. 10. Sensibilidade da Curva C/E ao Downtime.

Da análise dos gráficos acima verifica-se que o nível de sensibilidade da curva é maior nos níveis intermediários do parâmetro de desempenho, principalmente para a faixa entre 60% e 80% de disponibilidade, comparado com a variação observada nos extremos.

Mantendo o critério de escolha do ponto mais próximo do requisito de 90% para cada curva, os diversos cenários foram simulados e posteriormente carregados no CATLOC© para análise de sensibilidade de custos resultando nos comportamentos mostrados pelas Fig. 11 e Fig. 12.

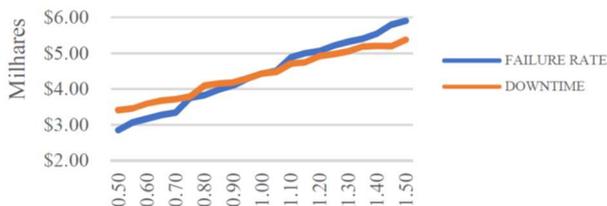
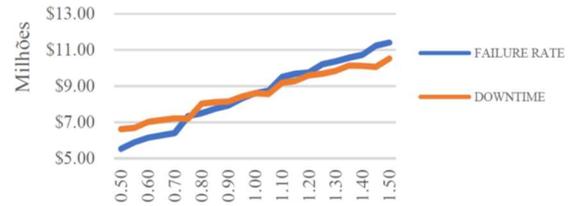


Fig. 11. CHV em Função da Variação da Taxa de Falha e do Downtime.

Fig. 12. CCV em Função da Variação da Taxa de Falha e do Downtime.

Os gráficos de sensibilidade de custo evidenciam que, para o caso estudado, tanto o custo de suporte em vida quanto o custo logístico da hora de voo são mais reativos a mudanças nos parâmetros de confiabilidade que nos de manutenibilidade.

Além disso, também é possível observar que o impacto é variável para cada incremento ou redução de 5%



implementada, de forma que o grau de melhoria alcançável em manutenibilidade ou confiabilidade influi diretamente na escolha, conforme pode ser melhor verificado na Tabela IV.

TABELA IV. VARIAÇÃO DE CUSTO DE CICLO DE VIDA (CCV) COM A TAXA DE FALHA E COM O DOWNTIME

Fator de Escala Taxa de Falha (ceteris paribus)	Variação de CCV	Fator de Escala Downtime (ceteris paribus)	Variação de CCV
0.50	-6.36%	0.50	-1.21%
0.55	-3.75%	0.55	-4.41%
0.60	-2.14%	0.60	-1.66%
0.65	-2.03%	0.65	-1.29%
0.70	-12.84%	0.70	0.40%
0.75	-2.19%	0.75	-10.33%
0.80	-3.01%	0.80	-1.27%
0.85	-2.54%	0.85	-0.42%
0.90	-4.68%	0.90	-3.25%
0.95	-3.19%	0.95	-1.96%
1.00	0.00%	1.00	0.00%
1.05	1.69%	1.05	-0.38%
1.10	8.82%	1.10	7.31%
1.15	1.79%	1.15	1.10%
1.20	0.77%	1.20	3.35%
1.25	4.57%	1.25	0.87%
1.30	1.73%	1.30	1.69%
1.35	1.87%	1.35	3.04%
1.40	1.48%	1.40	-0.31%
1.45	4.68%	1.45	-0.44%
1.50	1.62%	1.50	4.54%

Os impactos mais relevantes ocorrem nos limiares (thresholds) a partir dos quais uma recomendação de aquisição de um item de maior valor passa a, ou deixa de existir.

Sendo assim, em havendo a viabilidade de ambas as alternativas de melhoria aqui estudadas, e sendo conhecidos os custos envolvidos na implantação de cada uma delas, o método demonstrou sua utilidade ao decisor na medida em que este pode desenvolver um modelo mais detalhado fundamentado nas diretrizes do modelo básico do presente estudo de caso para identificar e optar pela melhor alternativa de investimento.

V. CONCLUSÃO

O estudo conduzido foi bem-sucedido, tendo alcançado seu objetivo ao confirmar a validade e a utilidade do modelo

para cálculo prospectivo dos custos de ciclo de vida e da hora de voo a partir de uma abordagem bottom-up de compilação de custos elementares. Apesar das limitações impostas pela licença de software disponível, os resultados indicam um grande potencial para aplicação do modelo como ferramenta de apoio à decisão.

De fato, a metodologia empregada é passível de expansão para incorporar a totalidade dos componentes de uma aeronave, bem como pode conceber estruturas de suporte logístico mais complexas que a utilizada. Embora no caso estudado se tenha optado por alterações conjuntas afetando todos os itens, ou todos os tempos de manutenibilidade, o modelo permite modificações individuais para testes de impacto focados em itens ou fatores de tempo mais críticos.

Quanto à limitação oferecida pela incerteza naturalmente associada aos dados necessários ao cálculo dos custos de vida, a modelagem apresentada demonstrou ser flexível o suficiente para receber atualizações de forma dinâmica, conforme a fase operacional se desenrolar, sem contudo deixar de oferecer uma linha de referência contra a qual o gerente do programa pode comparar o desempenho real do seu sistema.

Ilustrando essa questão, a análise de sensibilidade conduzida demonstrou que há diferença significativa de impacto para alterações em valores de taxas de falhas e tempos de manutenibilidade. Esses fatores devem ser controlados pelo gerente, no entanto cada projeto possui peculiaridades que vão resultar em diferentes níveis de dificuldade para o combate em cada uma das frentes acima. Neste aspecto, o modelo ora desenvolvido permite ao tomador de decisão testar cenários e identificar qual abordagem é a mais efetiva.

Do ponto de vista da concepção do sistema, para fins de projeto e planejamento, ficou evidenciado que é fundamental a comparação dos resultados frente a possíveis alterações na arquitetura da rede de suporte logístico, ou na confiabilidade dos equipamentos e de seus componentes, a fim de identificar qual alternativa oferece melhor ganho dado um orçamento disponível para ser investido na melhoria do sistema.

Para tanto, é condição *sine qua non* que tal decisão ocorra nas fases iniciais do ciclo de vida do sistema alvo, uma vez que há elevada probabilidade de que potenciais ganhos de confiabilidade e manutenibilidade demandem mudanças de projetos de engenharia e/ou fornecedores, o que deve ser feito o quanto antes considerando-se as implicações financeiras e logísticas de proceder tais modificações quando a frota já está em fase operacional.

REFERÊNCIAS

- [1] AeroSpace and Defence Industries Association of Europe and Aerospace Industries Association, "SX000i - International guide for the use of the S-Series Integrated Logistic Support (ILS) Specifications," 2016. [Online]. Available: <http://www.sx000i.org>. [Acesso em 21 05 2018].
- [2] B. S. Blanchard, Logistics Engineering & Management, Harlow: Pearson Education Limited, 2014.
- [3] Defense Acquisition University, "Integrated Product Support (IPS) Element Guidebook," 01 12 2011. [Online]. Available: [https://www.dau.mil/tools/t/Integrated-Product-Support-\(IPS\)-Element-Guidebook-](https://www.dau.mil/tools/t/Integrated-Product-Support-(IPS)-Element-Guidebook-). [Acesso em 03 06 2018].
- [4] Defense Acquisition University, "Product Support Manager (PSM) Guidebook," 1 4 2016. [Online]. Available: [https://www.dau.mil/tools/t/Product-Support-Manager-\(PSM\)-Guidebook-](https://www.dau.mil/tools/t/Product-Support-Manager-(PSM)-Guidebook-). [Acesso em 24 05 2018].
- [5] B. S. Dhillon, Life Cycle Costing, Amsterdam: Gordon & Brown Science Publishers, 1989.
- [6] C. C. Sherbrooke, Optimal Inventory Modeling of Systems: Multi-Echelon Techniques, New York: Kluwer Academic Publishers, 2004.
- [7] F. S. Nowlan e H. F. Heap, "Reliability-Centered Maintenance," United Airlines, San Francisco, 1978.
- [8] H. C. Marques, F. T. M. Abrahão, J. N. Filho e D. C. Mota, "Amadurecimento da Confiabilidade de Sistemas em Desenvolvimento: Análise de Impacto nos Custos de Aquisição pelas Forças Armadas Brasileiras," em XIX Simpósio de Aplicações Operacionais (SIGE), São José dos Campos, 2017.
- [9] Quanterion Solutions Incorporated, System Reliability Toolkit - V: New Approaches and Practical Applications, Utica: Quanterion Solutions Incorporated, 2015.
- [10] M. Boito, E. G. Keating, J. Wallace, B. DeBlois e I. Blum, "Metrics to Compare Aircraft Operating and Support Costs in the Department of Defense," RAND Corporation, Santa Monica, 2015.
- [11] Diretoria de Material Aeronáutico e Bélico, "Custo Logístico da Hora de Voo," Comando da Aeronáutica, Brasília, 2010.