

Modernização de Meia Vida de Aeronaves Militares: Uma avaliação da melhor política.

José Tadeu Medeiros do Vale¹, Mischel Carmen Neyra Belderrain¹, Fernando Teixeira Mendes Abrahão¹
¹Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos/SP – Brasil

Resumo – O presente artigo tem por objetivo apresentar resultados iniciais gerados a partir proposição de um modelo matemático que permita a definição de uma política ótima de substituição de equipamentos que sofram obsolescência tecnológica. O modelo de decisão foi representado por um modelo de programação dinâmica probabilística, tendo as preferências do decisor representadas por funções de utilidade e identificando o conjunto de estados e ações que representam a utilidade máxima esperada. Os resultados encontrados mostraram a utilidade do modelo em identificar o momento ótimo de substituição para uma combinação de equipamentos, demonstrando a capacidade de ser utilizado em um contexto de modernização de meia vida.

Palavras-Chave – Modernização, Programação Dinâmica Probabilística, Utilidade

I. INTRODUÇÃO

De acordo com [1] um sistema de engenharia complexo pode ser visto como um sistema em que é mandatária uma coordenação multidisciplinar para permitir o seu bom funcionamento.

Neste contexto, [2] define o conceito de ILS, do inglês *Integrated Logistic Support*, como a chave para o gerenciamento do ciclo de vida de um sistema, baseando-se na integração de tarefas associadas aos elementos do ILS. [3] define ciclo de vida como “o exame dos sistemas abrangendo todas as fases da sua existência, incluindo desde a sua concepção e design, a sua produção e/ou construção, sua operação e suporte e, finalmente, seu descarte”.

Os elementos do ILS são responsáveis por prover um arcabouço estruturado para o gerenciamento do suporte a sistemas complexos, devendo ser considerados durante o desenvolvimento e continuamente avaliados durante o ciclo de vida [2].

Dentro do contexto da fase de operação e suporte, conforme [2], pode-se conceituar o elemento do ILS engenharia de suporte como aquele responsável por assegurar a operação continuada e a manutenção do sistema com riscos gerenciados, através de atividades que busquem garantir a não degradação do desempenho técnico do sistema ao longo do ciclo de vida.

Também fazem parte desse elemento, durante a fase de serviço, atividades que incluem as oportunidades para melhorar ou modificar o desempenho de sistemas de campo, baseados na oportunidade tecnológica ou quando envolver cenários de ameaça [2].

Ainda, de acordo com [2] o elemento do ILS gerenciamento do suporte ao produto é o responsável planejar e controlar as atividades relacionadas ao desempenho de um

sistema durante seu ciclo de vida.

As atividades técnicas que podem ser desenvolvidas para atuar na melhoria ou modificação do desempenho de sistemas estarão relacionadas a análises de viabilidade e podem incluir: contratação de desenvolvimento de sistemas novos; substituição por sistemas COTS, do inglês *commercial off the shelf*; modernização; e manutenção do sistema sem modificações.

Em um contexto de defesa, conceitua-se Modernização de Meia Vida, do inglês *Mid Life Upgrade*, como uma modificação do projeto original para estender a utilidade e capacidade de um Sistema de Armas. Essa ação pretende estender o ciclo de vida de sistemas já empregados, reduzindo também, custos com treinamento e adequação de instalações [4].

Este artigo tem foco nas atividades de substituição de equipamentos no contexto de modernização de meia vida de uma frota de aeronaves de defesa, ou seja, aeronaves cuja operação é estritamente militar.

Do estudo realizado por [5], os problemas de substituição de equipamentos podem ser divididos em dois grupos: aqueles relacionados à vida econômica e aqueles relacionados à obsolescência.

Relativo ao grupo de problemas que envolvem obsolescência, a literatura aborda dois fatores para realizar esta análise. Neste trabalho estarão relacionados às características técnicas e tecnológicas do problema: obsolescência técnica: Ocorre quando o equipamento em análise possui produção descontinuada pela indústria, não havendo mais suporte à manutenção do equipamento [6] e [7]; e obsolescência tecnológica: Ocorre quando o equipamento não possui a tecnologia mais moderna disponível no mercado [5] e [8].

[9] elenca 3 (três) fatores principais que impactam na necessidade de realização de uma modernização de meia vida de aeronaves militares: As fases do ciclo de vida, anteriores à Operação demoram de 5 a 15 anos; quando os equipamentos iniciam a operação, algumas tecnologias embarcadas já se encontram obsoletas ou não possuem as tecnologias mais modernas disponíveis no mercado; e o ciclo de vida operacional de aeronaves militares é longo (acima de 30 anos), acarretando em desgaste, obsolescência e problemas relacionados à segurança da operação e às regulações.

Esses fatores mostram que a necessidade de ferramentas e modelos de apoio à decisão, quanto à substituição de equipamentos, inicia-se no início da operação de sistemas complexos de defesa e se estende por todo o seu ciclo de vida.

Ainda no contexto de substituição de equipamentos [7], ao apresentar um arcabouço de informações para

substituição de equipamentos que sofrem obsolescência tecnológica, reportou a necessidade da definição de um modelo que permita avaliar incertezas nas recompensas advindas das substituições de equipamentos, por meio da habilitação, nos modelos teóricos de substituição de equipamentos, da importância dada pelo tomador de decisão às melhorias operacionais provocadas pela substituição.

Nesse sentido, o objetivo geral desse trabalho é apresentar resultados iniciais gerados a partir proposição de um modelo matemático que permita a definição de uma política ótima de substituição de equipamentos que sofrem obsolescência tecnológica, no contexto de uma decisão de modernização de meia vida de um sistema aeronáutico de defesa, considerando as características do decisor.

Este artigo está estruturado em quatro seções, além desta introdutória. A segunda seção apresenta a fundamentação teórica. A terceira seção apresenta a metodologia empregada. A quarta seção apresenta os resultados e discussão. Finalmente, as conclusões do estudo são apresentadas, bem como as referências.

II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O problema clássico de substituição de equipamentos busca uma política de substituição que minimiza o custo total descontado para um problema estacionário onde a taxa de interesse e a estrutura de custo se mantém constante em horizonte infinito [5].

A vida econômica de um equipamento é a vida em serviço n , que resulta em um mínimo custo anual equivalente, conforme definido em (1):

$$EAC(n) = \left(\frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} \right) \left(p + \frac{S_n}{(1+r)^n} + \sum_{i=1}^n \frac{O_i}{(1+r)^i} \right) \quad (1)$$

Onde: $EAC(n)$ representa o custo anual equivalente de um equipamento com uma vida em serviço de n períodos, r é a taxa de desconto anual, p é o preço de aquisição de um novo equipamento, S_n é valor residual de um equipamento com “idade” n , e O_i é o custo de operação e manutenção durante o período i .

[10] apresenta o problema clássico de substituição de equipamentos modelado como um problema de programação dinâmica. Para um equipamento que possui t anos no início do ano i , o problema é estabelecido em (2), onde K e R representam as decisões possíveis e t representa o estado do equipamento:

$$f_i^n(t): \text{máxima receita líquida para os anos } i, i + 1, \dots, n. \quad (2)$$

$$f(t) = \max \begin{cases} K: r(t) - c(t) + f_{i+1}(i + 1) \\ R: r(0) + s(t) - I - c(0) + f_{i+1}(t) \end{cases}$$

$$f_{n+1}(\cdot) \equiv 0$$

[11] ressalta que a transformação de um estado pode depender: 1. Do estado em que o sistema se encontra; 2. Da decisão tomada; e 3. De fatores imprevisíveis e não controlados pelo decisor.

A existência de fatores imprevisíveis e não controlados transforma o problema clássico em um problema de programação dinâmica probabilística. Nesse caso, a função objetivo é, normalmente, a maximização do valor atual

esperado dos retornos dos estágios.

O modelo desenvolvido como programação dinâmica probabilística deve envolver a definição de cinco elementos: estágio (épocas de decisão); conjunto de estados possíveis para o processo no estágio; conjunto de decisões possíveis para o estado e estágio; probabilidade de transição de estados; e recompensa ou custo de transição de um estado para outro.

Esses elementos podem ser representados conforme a

Fig. 1.

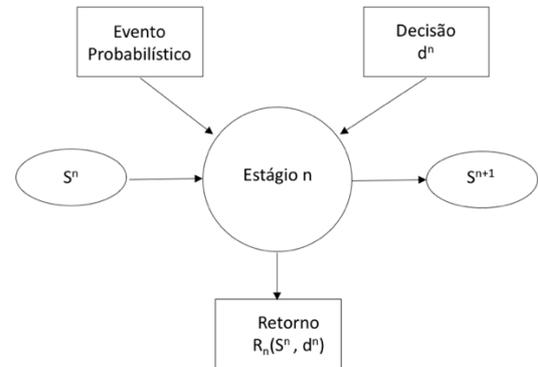


Fig. 1- Representação dos elementos de uma programação dinâmica probabilística.

Fonte: adaptado de [11]

III. METODOLOGIA

A metodologia empregada neste trabalho foi baseada em uma proposta de [12], cuja adaptação sugerida pelo autor encontra-se apresentada na Fig. 2.

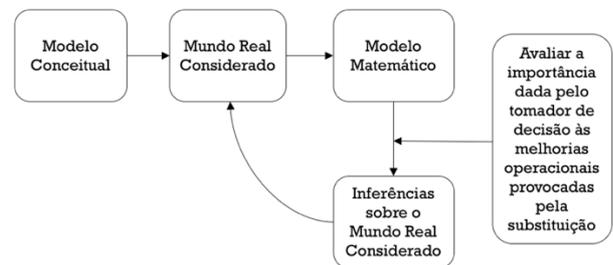


Fig. 2 – Modelo empregado no trabalho.

Fonte: O autor

Neste contexto, foi desenvolvido um modelo conceitual cujo objetivo é apresentar a abrangência do problema estudado e as limitações definidas como escopo deste trabalho para representar o mundo real considerado. Essas limitações permitirão a elaboração de um modelo matemático que possa explorar a situação problema.

O modelo conceitual desenvolvido foi apresentado a especialistas em engenharia logística da Força Aérea Brasileira com o objetivo de ser criticado e aceito como representativo do modelo de decisão utilizado dentro de uma organização militar, no contexto de modernização de aeronaves militares. O modelo conceitual encontra-se apresentado na Fig. 3.

Do modelo conceitual apresentado, observa-se que a

obsolescência tecnológica é um dos fatores determinantes para a necessidade de realização de uma modernização de meia vida. Este tipo de obsolescência possui como fatores contribuintes principais o surgimento de novas tecnologias, com novas utilidades e desempenho superior, que pode ser resumido na recompensa ocasionada pela substituição; bem como determinações de órgãos reguladores que podem restringir a operação caso determinadas tecnologias não estejam instaladas na aeronave.

Associado a isto, as substituições de novos equipamentos em aeronaves são realizadas por meio do cumprimento de diretivas técnicas, que instruem a equipe técnica com as tarefas de manutenção necessárias. Essas tarefas de manutenção podem ser entendidas como tarefas adicionais de manutenção que impactam em tempo da aeronave parada e, conseqüentemente, impacto na disponibilidade do sistema.

Neste aspecto, 3 (três) características devem ser levadas em consideração ao modelar a decisão de substituição de equipamentos por obsolescência tecnológica, no contexto de modernização de aeronaves: Custo; Utilidade de novos equipamentos (recompensa); e Impacto em disponibilidade.

Da definição de obsolescência tecnológica, observou-se que ela depende do surgimento de novas tecnologias no mercado. Neste aspecto, [13] sugere que a probabilidade de surgimento de novas tecnologias, ou seja, que a probabilidade de um equipamento se encontrar obsoleto tecnologicamente pode ser representada por uma distribuição exponencial.

Desta característica estocástica da obsolescência tecnológica surge a necessidade de modelar o problema de substituição como um problema de programação dinâmica probabilística.

O modelo de programação dinâmica probabilística tomará como hipótese que a decisão a ser tomada em cada estágio de decisão dependerá apenas do estado atual e não das decisões tomadas em estágios anteriores, respeitando o princípio da otimalidade de Bellman.

De acordo com o princípio da otimalidade de Bellman uma política ótima remanescente a partir de um determinado

estado deverá ser uma política ótima em relação aos estados anteriores, ou seja, uma política ótima é uma composição de subpolíticas ótimas [14].

O problema de decisão modelado matematicamente envolve a decisão de substituição de um item i que sofre obsolescência tecnológica e será admitido que:

1. Existe um item i tecnologicamente defasado instalado na aeronave (este item será definido como: item $i = 0$);
2. Existe um item i tecnologicamente superior disponível no mercado para ser instalado na aeronave (item $i = 1$); e
3. Existe uma probabilidade associada à obsolescência do item $i = 1$ para o surgimento de um item com tecnologia superior $i = 2$ no mercado.

A Fig. 4 representa o problema de decisão quanto à dinâmica existente entre os itens $i = 0, 1$ e 2.

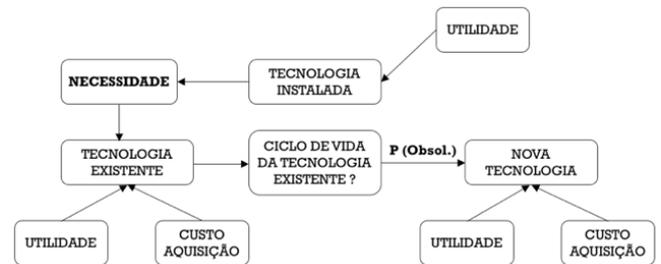


Fig. 4 – Representação esquemática do problema de decisão.

Fonte: O autor.

Algumas variáveis do problema de decisão fazem parte da natureza do tomador de decisão. Esta natureza pode ser representada através de uma função de utilidade. [15].

Ainda de acordo com [15], função de utilidade busca associar aos prêmios monetários valores de uma quantidade abstrata chamada utilidade, de modo a convenientemente representar o comportamento real do decisor perante as situações de risco.

Esta abordagem possui a vantagem de possibilitar analisar situações em que os prêmios são qualitativos, pela substituição, também aqui, desses prêmios por valores de

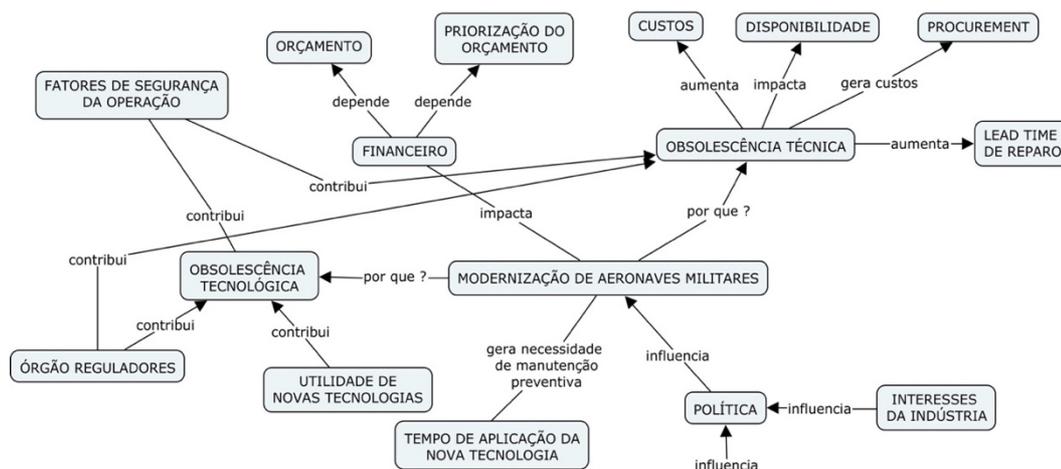


Fig. 3 – Modelo Conceitual

Fonte: O autor

utilidade [15].

Assim, utilizando-se do conceito de funções de utilidade e dos aspectos de Custo; Utilidade de novos equipamentos (recompensa); e Impacto em disponibilidade do modelo de decisão de substituição de equipamentos por obsolescência tecnológica, definiram-se os seguintes atributos do modelo matemático, representados pelas funções de utilidade r_i, u_c e u_τ , onde:

r_i : Utilidade percebida na substituição pela tecnologia i , com $i = 0, 1$ e 2 , conforme definido anteriormente;

u_c : Utilidade percebida no custo de aquisição; e

u_τ : Utilidade percebida no impacto na disponibilidade provocada pela a ação de substituição.

[15], argumentam que funções de utilidade empíricas devem ser encaradas com certa reserva. Se considerarmos que o objetivo da Análise de Decisão é auxiliar as pessoas a tomarem decisões melhores e mais coerentes, concluiremos que talvez seja mais indicado, em certos casos, empregar funções matemáticas padronizadas para representar as preferências do agente decisório. Neste caso, os parâmetros do modelo matemático poderão ser então escolhidos de forma que as decisões tomadas, tendo por base o referido modelo, sejam compatíveis com a estrutura de preferências do decisor.

Nesse sentido, [16] apresentou em um estudo da USAF (*United States Air Force*) que a utilidade de um novo equipamento, inserido no mercado de defesa, começa baixa, então rapidamente atinge um pico, passando a decrescer ao longo da idade do equipamento.

Utilizando do conceito de [16], foi proposta a função de utilidade representada pela equação 3, onde o crescimento é quadrático no início do ciclo de vida, passando a decrescer exponencialmente ao longo do ciclo de vida.

$$r(t) = \begin{cases} -\frac{4\lambda(w-1)}{T_k^2}(t-1)^2 + \frac{4\lambda(w-1)}{T_k}(t-1) + C; & 0 \leq t \leq T_k \\ C e^{-\lambda(t-T_k)}; & t > T_k \end{cases} \quad (3)$$

Para representar a utilidade percebida no custo de aquisição de uma nova tecnologia utilizou-se da equação 4, onde foi inserido um ponto a partir do qual o custo para a ter impacto na decisão de substituição. O custo mínimo, apresentado na equação 4 por \bar{M} , é o custo médio de manutenção do item pré-existente. A partir de \bar{M} a utilidade passa a crescer exponencialmente.

$$u_c(t) = \begin{cases} 0; & \text{custo} \leq \bar{M} \\ 1 - e^{-\pi_c(\text{custo} - \bar{M})}; & \text{custo} > \bar{M} \end{cases} \quad (4)$$

Para representar a utilidade percebida no impacto na disponibilidade provocada pela a ação de substituição, utilizou-se do conceito de variação percentual da disponibilidade, de modo que:

$$u_\tau(t) = 1 - e^{-\theta\delta}, \quad \delta > 0 \quad (5)$$

Onde:

$$\Delta\% \text{ da disponibilidade} = \frac{\text{Disp}_{\text{anterior}} - \text{Disp}_{\text{posterior}}}{\text{Disp}_{\text{anterior}}}, \text{ e:}$$

$$\delta = \Delta\% \text{ da disponibilidade} =$$

$$= \frac{\bar{T}_{\text{apl}} \times A}{365 \times A - \bar{N}_{\text{ip}} \times \bar{M}_p}, \text{ com } \bar{T}_{\text{apl}} \text{ e } \bar{M}_p \text{ são expressos em dias}$$

\bar{T}_{apl} = tempo médio de aplicação da modificação;

\bar{M}_p = tempo médio da inspeção programada; e

$$\bar{N}_{\text{ip}} = \frac{\text{Esforço Aéreo}}{\text{Intervalo de Manutenções}} =$$

Quantidade média de inspeções programadas.

Após a definição das funções de utilidades que representam os atributos do modelo matemático de decisão, podemos definir os demais elementos que permitirão representar o modelo de programação dinâmica probabilística, qual sejam: estágio: Decisão no início de cada ano do ciclo de vida do sistema complexo; recompensa do período: $f_t^T(k_t, k_{t+1})$; restrições: Estados possíveis, representado por: $\Gamma_t(k_t)$; e probabilidade de transitar para um estado que representa a obsolescência: p_t

Assim, para representar o modelo de decisão, podemos o fazer através da equação de Bellman, cuja representação para o problema proposto pelo autor segue apresentada na equação 6:

$$F_t^T(k_t) = \max_{k_{t+1} \in \Gamma_t(k_t)} [f_t^T(k_t, k_{t+1}) + \beta \times F_{t+1}^T(k_{t+1})] \quad (6)$$

Onde a equação de Bellman representa a recompensa imediata, correspondendo ao valor máximo da soma do valor recompensa do período e da recompensa descontada esperada dos demais estados, supondo que o agente escolha a ação ótima.

O conjunto de estados possíveis $\Gamma_t(k_t)$ será representado na forma (u, v) , onde u representa a tecnologia i atualmente utilizada e v representa uma tecnologia mais recente, que convive com i .

Assim, dada a nomenclatura apresentada anteriormente para os itens 0, 1 e 2, podemos definir o conjunto de estados possíveis como: $\{(0,1); (1,1); (0,2); (1,2) \text{ e } (2,2)\} \in \Gamma_t(k_t)$.

Deste modo é possível observar as ações possíveis de serem tomadas pelo decisor a partir do estado em que o processo decisório se encontra:

Estando no estado $(0,1)$, o decisor pode tomar as ações R_1 e K_0 , onde R_1 representa substituir a tecnologia 0 pela tecnologia 1 e K_0 representa manter a tecnologia 0 instalada.

Estando no estado $(1,1)$, a única decisão possível é manter a tecnologia 1 (K_1), dado que não existe outra disponível para substituição.

Estando no estado $(0,2)$, o decisor pode tomar as ações R_1, R_2 e K_0 .

Estando $(1,2)$, o decisor pode tomar as ações R_2 e K_1 .

Estando no estado $(2,2)$, a única decisão possível é manter a tecnologia 2 (K_2).

Assim, as equações de Bellman para cada estado podem ser definidas conforme as equações 7 a 12, observado o fator de desconto β e o uso do conceito de recompensa esperado para os estados futuros que dependem da variável estocástica obsolescência tecnológica, representada por p_t , onde t é o estágio da decisão.

$$F_t^T(0,1) = \max \begin{cases} R_1: -u_{c1t} - u_{\tau1t} + r_{1t} + \\ + \beta \left\{ (1 - p_{t+1}) F_{t+1}^T(1,1) + \right. \\ \left. + p_{t+1} F_{t+1}^T(1,2) \right\} \\ K_0: r_{0t} + \beta \left\{ (1 - p_{t+1}) F_{t+1}^T(0,1) + \right. \\ \left. + p_{t+1} F_{t+1}^T(0,2) \right\} \end{cases} \quad (7)$$

$$F_t^T(1,1) = r_{1t} + \beta\{(1 - p_{t+1})F_{t+1}^T(1,1) + p_{t+1}F_{t+1}^T(1,2)\} \quad (8)$$

$$F_t^T(0,2) = \max \begin{cases} R_2: -u_{c_{2t}} - u_{\tau_{2t}} + r_{2t} + \beta F_{t+1}^T(2,2) \\ R_1: -u_{c_{1t}} - u_{\tau_{1t}} + r_{1t} + \beta F_{t+1}^T(1,2) \\ K_0: r_{0t} + \beta F_{t+1}^T(0,2) \end{cases} \quad (9)$$

$$F_t^T(1,2) = \max \begin{cases} R_2: -u_{c_{2t}} - u_{\tau_{2t}} + r_{2t} + \beta F_{t+1}^T(2,2) \\ K_1: r_{1t} + \beta F_{t+1}^T(1,2) \end{cases} \quad (10)$$

$$F_t^T(2,2) = r_{2t} + \beta F_{t+1}^T(2,2) \quad (11)$$

$$F_{T+1}^T(u, v) \equiv 0 \quad (12)$$

O modelo matemático do problema de decisão sequencial para a substituição de equipamento que sofre obsolescência tecnológica foi implementado com um problema de horizonte finito (T), onde T representa a expectativa de ciclo de vida, sem levar em consideração a possibilidade de extensão do ciclo de vida do sistema complexo em estudo.

Para a solução da programação dinâmica probabilística, adotou-se um algoritmo recursivo regressivo.

O modelo matemático proposto até este momento baseia-se na análise de políticas individuais, ou seja, para apenas 1 (um) equipamento, e busca como resultado a melhor política de substituição, ou seja, a sequência de decisões ao longo do tempo que resulta no valor máximo de $F_0^T(0,1)$, onde T é o horizonte finito do modelo de programação dinâmica probabilística. A melhor política será aqui denominada θ_j , onde j é a denominação do equipamento individual em análise.

A extrapolação do modelo matemático para n itens pretende encontrar uma política de substituição, diferente das ótimas individuais, onde as ações de substituição (R_1, R_2) ocorram no mesmo estágio t . As políticas de substituição não ótimas de cada item j serão aqui denominadas θ'_j .

Assim, buscando extrapolar para n itens, foi definido um modelo baseado na minimização das perdas geradas pela adoção de políticas individuais não ótimas.

Dessa forma, define-se a função denominada $F_{MOD}(t)$, tal que:

$$F_{MOD}(t) = \sum_{j=1}^n \Delta(\theta'_j(t)); \forall t \in [0, T] \quad (13)$$

Onde:

$$\Delta(\theta'_j(t)) = F_{0j}^T(\theta_j) - F_{0j}^T(\theta'_j(t)) \quad (14)$$

e

$$F_{tj}^T(k_{tj}) = \max_{k_{tj+1} \in \Gamma_{it}(k_{tj})} \left[f_{tj}^T(k_{tj}, k_{tj+1}) + F_{tj+1}^T(k_{tj+1}) \right], \forall j \quad (15)$$

Da definição de $F_{MOD}(t)$, temos que o estágio de decisão para a substituição de n itens, aqui denominado $t = T_{MOD}$, será aquele tal que $F_{MOD}(t)$ é mínimo, ou seja, as perdas geradas pela adoção de políticas individuais não ótimas sejam mínimas.

IV. RESULTADOS

O modelo proposto foi implementado em ambiente *excel* para teste do modelo em um horizonte finito curto, $T = 5$.

Os resultados iniciais apresentados neste artigo foram gerados a partir de valores de teste arbitrários de 2 (dois) equipamentos A e B.

Os parâmetros de teste para as funções de utilidade e para o risco de obsolescência encontram-se apresentados nas Tabelas 2 a 7, do Apêndice. O fator de desconto utilizado foi $\beta = 0,8$. Este fator descreve a preferência do decisor por recompensas atuais sobre recompensas futuras [17].

Os resultados apresentados para o cálculo de $\Delta(\theta'_j(t))$ e de $F_{MOD}(t)$ encontram-se apresentados na Tabela 5 e representados graficamente na Fig. 5.

Os dados da tabela 5 mostram que a política ótima do equipamento A previa uma substituição em $t = 2$ ($\Delta_2 = 0$), enquanto que para o equipamento B, a política ótima de substituição deveria ser realizada em $t = 1$ ($\Delta_1 = 0$).

TABELA 1 – CÁLCULO DE $\Delta(\theta'_j(t))$ E DE $F_{MOD}(t)$

	Δ_0	Δ_1	Δ_2	Δ_3	Δ_4	Δ_5
Eq. A	3,198	0,818	0	0,277	2,494	3,517
Eq. B	0,391	0	0,601	2,64	4,023	4,577
$F_{MOD}(t)$	3,589	0,818	0,601	2,917	6,517	8,094

Ainda se observou que o estágio de decisão que apresentou mínima perda foi o $t = 2$, com $F_{MOD}(2) = 0,601$.

O resultado mostra que o modelo permite entregar uma solução que representa o a utilidade máxima esperada para uma sequência de estados (gerados por uma sequência de decisões) e que pode ser interpretada como uma decisão ótima a partir da teoria da utilidade multiatributo, onde cada estado pode ser visualizado como um atributo da sequência de estados [17].

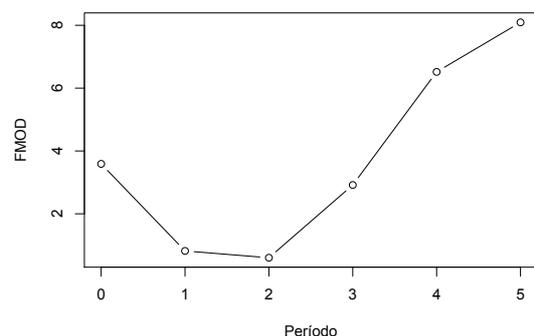


Fig. 5 – Gráfico da função $F_{MOD}(t)$

V. CONCLUSÃO

Os resultados gerados atingiram o objetivo de apresentar resultados que servem como teste inicial do modelo de decisão proposto.

Eles mostraram a utilidade do modelo em identificar o momento ótimo de substituição para uma combinação de equipamentos, demonstrando a capacidade de ser utilizado em um contexto de modernização de meia vida.

O modelo proposto atinge o caráter ótimo aplicado a um problema sequencial, ou seja, de decisões sequenciais para um exemplo de decisão em horizonte finito.

Como sugestões para trabalhos futuros pode-se citar a necessidade de:

1. Utilizar estratégias de análise de cenários para identificar a faixa de validade dos parâmetros das funções de utilidade para cada perfil do decisor, quais sejam: propenso ao risco, avesso ao risco e neutro;
2. Realizar análises de sensibilidade dentro das faixas de parâmetros identificadas para os perfis de decisor para propor uma avaliação das políticas ótimas geradas pelo modelo;
3. Buscar interpretações físicas para os valores ótimos apresentados na saída do modelo que representam a utilidade máxima esperada.

APÊNDICE

TABELA 2 – PARÂMETROS DE TESTE PARA A FUNÇÃO RECOMPENSA

	Tk0	Tk1	Tk2	λ_0	λ_1	λ_2
Eq. A	2	2	2	1	1,3	1
Eq. B	2	2	2	1	1	1,3

TABELA 3 – PARÂMETROS DE TESTE PARA A FUNÇÃO RECOMPENSA (CONTINUAÇÃO)

	ω_0	ω_1	ω_2	c0	c1	c2	I 0	I 1
Eq. A	1,2	1,5	1	0,1	0,08	0,1	1	1
Eq. B	1,2	1	1,5	0,1	0,1	0,05	2	3

TABELA 4 – PARÂMETROS DE TESTE PARA A FUNÇÃO CUSTO

	M0	M1	π_{c1}	π_{c2}	Custo 1	Custo 2
Eq. A	150	200	1,2	0,5	200	300
Eq. B	180	180	0,5	1,2	200	200

TABELA 5 – PARÂMETROS DE TESTE PARA A FUNÇÃO IMPACTO NA DISPONIBILIDADE

	θ_1	θ_2	Tap11	Tap12	Mp
Eq. A	12	10	150	200	100
Eq. B	12	10	200	100	100

TABELA 6 – PARÂMETROS DE TESTE PARA A FUNÇÃO IMPACTO NA DISPONIBILIDADE (CONTINUAÇÃO)

	Int. Manut.	Esforço	Frota
Eq. A	300	10000	70
Eq. B	300	10000	70

TABELA 7 – PARÂMETROS DA FUNÇÃO DENSIDADE DE PROBABILIDADE DE OBSOLESCÊNCIA

	γ	I 0	I 1
Eq. A	0,8	1	1
Eq. B	0,8	2	3

REFERÊNCIAS

- [1] MO, J.P. J.; SINHA, A. **Engineering systems acquisition and support**. Elsevier, 2014.
- [2] 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].
- [3] BLANCHARD, B. S. **Logistic Engineering and Management**. Prentice Hall, Inc., 1998.
- [4] PYLES, R. A. "Aging aircraft," *RAND Organization*, 1999.
- [5] HARTMAN, J. C.; TAN, C. H. Equipment replacement analysis: a literature review and directions for future research. **The Engineering Economist**, v. 59, n. 2, p. 136-153, 2014.
- [6] KUMAR, U. D.; SARANGA, H. Optimal selection of obsolescence mitigation strategies using a restless bandit model. **European Journal of Operational Research**, v. 200, n. 1, p. 170-180, 2010.
- [7] HARTMAN, J. C.; TAN, C. H. "Modeling Technological Change in Equipment Replacement Models" Chapter 3 (pp. 70-91) in **Optimal Control of Age-structured Populations in Economy, Demography, and the Environment**, Raouf Boucekkine, Natali Hritonenko and Yuri Yatsenko (eds.), Taylor and Francis (Routledge Explorations in Environmental Economics), London, UK, 2011
- [8] NAIR, S. K.; HOPP, W. J. A model for equipment replacement due to technological obsolescence. **European Journal of Operational Research**, v. 63, n. 2, p. 207-221, 1992.
- [9] Department of Defense, "Systems engineering fundamentals," ed. USA, 2001.
- [10] TAHA, H. A. **Pesquisa Operacional**. Pearson Education do Brasil, 2008.
- [11] FERREIRA, L. C. R. Desenvolvimento de modelos de otimização da gestão florestal em situações de risco de incêndio. 2011
- [12] MITROFF, I. I. *et al.* On Managing Science in the Systems Age: Two Schemas for the Study of Science as a Hole Phenomenon. **Interfaces**, v. 4, n. 3, p. 46-58, 1974.
- [13] CHISARI, O. O. **Regulatory Economics and Quantitative Methods: Evidence from Latin America**. [s.l.] Edward Elgar, 2007.
- [14] BELLMAN, R., 1957. **Dynamic Programming**. Princeton University Press, Princeton, NJ.
- [15] BEKMAN, O. R.; DE OLIVEIRA COSTA NETO, P. L. **Análise estatística da decisão**. [s.l.] Editora E. Blücher, 1980.
- [16] DIXON, M. C; Project Air Force (U.S.) (2006) The maintenance costs of aging aircraft: insights from commercial aviation. Santa Monica: RAND Corporation Air Force.
- [17] RUSSELL, S. J.; NORVIG, P. **Inteligencia Artificial**. Editora Campus, 2004.