Abordagem Multicritério para a Seleção de Estratégias de Gerenciamento da Frota de Aeronaves Militares

João Guilherme Ramos Trindade[1], Gabriel Scarin Vaz[1], Eduardo Caxero da Silva Coelho[1], Antônio Vitor Santos Silva[1], Raphael Estrela Nunes[1], Daniel Alberto Pamplona[1], Jônatas A. de Almeida[1,2]
[1]Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos/SP – Brasil
[2]Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Caruaru/PE – Brasil

***Resumo*—Este artigo apresenta uma abordagem estruturada e matematicamente rigorosa para a definição da estratégia de gerenciamento do ciclo de vida de uma frota de aeronaves militares da Força Aérea Brasileira (FAB) destinadas à patrulha estratégica da Zona Econômica Exclusiva (ZEE). O problema foi modelado utilizando o *framework* de decisão multicritério (MCDA), fundamentado na Teoria do Valor Multiatributo (MAVT). Aplicou-se a estruturação baseada em *Value-Focused Thinking* (VFT) para levantamento dos objetivos fundamentais. Na fase de modelagem de preferências, justificou-se a escolha de uma racionalidade compensatória determinística por meio da Teoria do Valor Multiatributo, utilizando funções de valor marginal lineares e elicitação flexível por meio do método FITradeoff. A análise considerou os critérios de custo, disponibilidade, falhas de segurança, soberania estratégica e tempo de implementação. A avaliação das alternativas revelou que a Alternativa 1 (Status Quo) não é dominada devido à sua pronta implementação, mas o processo de elicitação apontou a Modernização (MLU) como a solução ótima para o gerenciamento da frota, equilibrando benefícios estratégicos e prontidão operacional.**

***Index Terms*— Apoio Multicritério à Decisão, Gerenciamento de Frota, Defesa Nacional.**

I. Introdução

A gestão do ciclo de vida de sistemas complexos de defesa representa um dos desafios mais críticos para as Forças Armadas na atualidade. Frotas de aeronaves militares, classificadas como sistemas dominados pela sustentação (*sustainment-dominated systems*), ao longo de décadas de operação contínua, enfrentam um declínio inevitável na sua disponibilidade operacional, acompanhado por um aumento expressivo nos custos de manutenção decorrentes da obsolescência logística e tecnológica de seus subsistemas [4]. Em ambientes de defesa nacional, onde os recursos financeiros são historicamente escassos e rigidamente controlados, a decisão sobre o momento exato e a estratégia ideal para o gerenciamento e a modernização ou substituição de uma frota aérea não se resume a uma análise puramente financeira, mas envolve uma intrincada teia de objetivos operacionais, técnicos, de segurança e de soberania nacional.

O objeto de estudo deste trabalho reside na frota de aeronaves de patrulha e vigilância marítima da Força Aérea Brasileira (FAB), cuja missão é salvaguardar e monitorar as águas jurisdicionais brasileiras [1], com foco especial na Zona Econômica Exclusiva (ZEE) — uma área de aproximadamente 4,5 milhões de km² de extrema relevância geopolítica e econômica (conhecida como "Amazônia Azul"). Esta região abriga imensas riquezas naturais, incluindo as reservas de petróleo do Pré-sal e rotas comerciais marítimas vitais para o comércio exterior do país. A manutenção de uma cobertura aérea contínua é indispensável para combater atividades ilegais (como pesca predatória de bandeira estrangeira, pirataria e narcotráfico), além de garantir capacidades rápidas de busca e salvamento (*Search and Rescue — SAR*) sob tratados internacionais.

Esta frota operacional, ao atingir o fim de sua vida útil tecnológica e logística, caracterizada por recorrentes períodos de indisponibilidade, dificuldades severas de suprimento de peças de reposição (devido à descontinuidade de fabricação por parte dos fornecedores originais) e obsolescência dos sensores de missão, acaba por gerar um cenário de vulnerabilidade estratégica nacional. A ausência de uma ação governamental imediata pode resultar em um "vazio de capacidade operacional", comprometendo a segurança nacional e a soberania da Amazônia Azul. A incapacidade de patrulhar a ZEE de forma efetiva abre precedentes para a exploração ilegal de recursos e enfraquece a posição diplomática brasileira em fóruns multilaterais que debatem a segurança marítima no Atlântico Sul.

O problema de decisão consiste na definição da melhor estratégia de gerenciamento da frota e transição de suas capacidades operacionais. A decisão possui caráter individual e centralizado, tendo como decisor primário o Comandante da Aeronáutica, assessorado por múltiplos atores especializados cujos papéis são detalhados na estruturação do problema.

Para lidar com a complexidade inerente a este problema, este artigo aplica o *framework* metodológico de apoio multicritério à decisão (*MCDA*) proposto por Almeida [2], integrando a estruturação de problemas baseada em objetivos (*Value-Focused Thinking — VFT*) com modelos quantitativos compensatórios baseados na Teoria do Valor Multiatributo (*MAVT*), utilizando o método FITradeoff [3] para a elicitação flexível de preferências e constantes de escala sob informação parcial.

O presente artigo está estruturado da seguinte forma: a Seção II apresenta a fundamentação teórica sobre gerenciamento e ciclo de vida de frotas e a contextualização de modelos *MCDA*; a Seção III detalha a metodologia baseada no *framework* de Almeida e no método FITradeoff; a Seção IV apresenta a aplicação prática do modelo, estruturação de critérios (incluindo o fator tempo de implementação), análise de dominância e discussão dos resultados baseados na inferência de preferências globais; e a Seção V consolida as conclusões e recomendações estratégicas.

J. G. R. Trindade, joaoguilhermeramostrindade@gmail.com; E. C. da S. Coelho, caxeroecsc@gmail.com; G. S. Vaz, vazgsov@ita.br; A. V. S. Silva, antonioavss@ita.br; R. E. Nunes, estrelaren@fab.mil.br; D. A. Pamplona, pamplona@ita.br; J. A. de Almeida, jonatasaa@yahoo.com.br.

II. Fundamentação Teórica

A. Gestão do Ciclo de Vida de Frotas e Sistemas de Defesa

A gestão do ciclo de vida (*Lifecycle Management*) de sistemas complexos de defesa, classificados como sistemas dominados pela sustentação (*sustainment-dominated systems*), estende-se por horizontes de 20, 30 ou até mais de 40 anos [4]. O gerenciamento desses sistemas exige equilibrar o Custo Total do Ciclo de Vida (*Whole Life Cycle Cost – WLCC*) com a manutenção de capacidades operacionais confiáveis ao menor custo possível. Um dos maiores agravantes nesse equilíbrio é o ciclo de vida dos componentes eletrônicos, significativamente mais curto que o das plataformas onde estão instalados, resultando em uma estimativa de que 70% a 80% desses componentes tornam-se obsoletos antes mesmo da entrada em serviço do sistema [4]. À medida que a frota envelhece, a manutenção torna-se progressivamente mais cara devido à escassez de partes e à necessidade de compras emergenciais ou de última hora (*Last Time Buy*) para estender a vida útil.

Portanto, o gerenciamento de uma frota no fim de sua vida útil tecnológica envolve uma decisão estratégica fundamental: manter o equipamento antigo até que o custo de substituí-lo seja menor que o custo de mantê-lo, ou realizar um redesenho (*redesign*) para modernização. Embora o redesenho permita a inserção de novas tecnologias e melhore a confiabilidade e manutenibilidade, ele é considerado a alternativa mais cara devido aos rigorosos e dispendiosos requisitos de requalificação e recertificação militar [5]. A adoção de estratégias proativas de mitigação, em vez de abordagens meramente reativas, é essencial para minimizar os impactos financeiros e operacionais causados pela obsolescência ao longo do ciclo de vida [5] [4].

B. Value-Focused Thinking (VFT)

O Value-Focused Thinking (VFT), abordagem consolidada por Keeney [6], propõe uma mudança de paradigma na estruturação de problemas decisórios: o decisor deve primeiramente articular seus valores e definir o que deseja alcançar para, somente então, conceber as formas de obtê-los. Essa perspectiva proativa contrapõe-se à lógica tradicional do Alternative-Focused Thinking (AFT), na qual o processo é reativo — o decisor foca nas alternativas imediatamente disponíveis, frequentemente limitando a avaliação a critérios de fácil mensuração e negligenciando objetivos subjetivos fundamentais. Ao colocar os valores como guias do processo, o VFT estimula a geração criativa de novas alternativas e garante que a escolha final esteja alinhada aos reais propósitos da organização.

C. Apoio Multicritério à Decisão (MCDA)

A tomada de decisão no setor de defesa lida com múltiplos critérios conflitantes e frequentemente intangíveis. Conforme detalhado por Almeida [2], o Apoio Multicritério à Decisão (MCDA) fornece um arcabouço metodológico estruturado para modelar essas preferências. A literatura MCDA divide-se majoritariamente em duas grandes abordagens de racionalidade.

A racionalidade compensatória, consolidada na Teoria do Valor Multiatributo (MAVT) para contextos determinísticos, baseia-se no pressuposto da comparabilidade completa e da transitividade das preferências, admitindo que um desempenho fraco em um critério pode ser compensado por desempenho excelente em outro. Diferente da Teoria da Utilidade Multiatributo (MAUT), que modela a atitude do decisor frente ao risco por meio de loterias probabilísticas, a MAVT foca estritamente na mensuração do valor sob condições determinísticas.

A racionalidade não-compensatória, desenvolvida pela escola europeia (famílias ELECTRE e PROMETHEE), rejeita a compensação irrestrita e admite a incomparabilidade entre alternativas, utilizando limiares de veto para impedir que desempenho inaceitável em um critério crítico seja compensado pela excelência nos demais.

No contexto deste artigo, a escolha metodológica recai sobre o modelo compensatório (MAVT), uma vez que o decisor estratégico necessita realizar ponderações e trade-offs explícitos entre os atributos operacionais da frota. A Tabela I sintetiza as propriedades comparativas dos dois paradigmas.

Tabela I
Comparação dos Paradigmas de Racionalidade MCDA

Característica	**Paradigma Compensatório (MAVT)**	**Paradigma de Sobreclassificação**
Axiomas Centrais	Comparabilidade, Transitividade	Admite Incomparabilidade
Compensação	Totalmente permitida	Rejeitada (uso de limites)
Estrutura Mat.	Função aditiva global	Relações de sobreclassificação
Constantes	Pesos de *trade-off*	Pesos como importância
Parâmetros	Funções de valor marginal e constantes de escala	Limiares de indiferença, preferência e veto
Carga Cognitiva	Elevada (fase de elicitação)	Moderada (fase de limiares)

D. O Método FITradeoff

Embora o modelo aditivo da MAVT seja amplamente consolidado, o procedimento tradicional de *trade-off* para a elicitação das constantes de escala (k_j) impõe uma elevada carga cognitiva ao decisor. A exigência de apontar pontos exatos de indiferença entre consequências hipotéticas frequentemente resulta em inconsistências lógicas e fadiga decisória, o que restringe sua eficiência em ambientes complexos e de alta pressão, como o contexto militar.

Para superar essas limitações mantendo o rigor axiomático da MAVT, Almeida *et al.* [3] desenvolveram o método FITradeoff (*Flexible and Interactive Tradeoff*). O método atua sob o paradigma da informação parcial, operando por meio de um processo flexível e interativo de elicitação. Em vez de exigir indiferença exata, o modelo solicita ao decisor apenas julgamentos de preferência estrita entre consequências predefinidas (por exemplo, a preferência entre obter o melhor desempenho no critério A e o pior no critério B, em oposição ao cenário inverso).

A cada resposta do decisor, o algoritmo estabelece inequações lineares que restringem o espaço geométrico das constantes de escala viáveis. A partir dessa informação parcial, o sistema aplica relações de dominância para reduzir o subconjunto de alternativas, eliminando aquelas que se tornam matematicamente dominadas. O processo de elicitação continua interativamente até que se obtenha uma recomendação única ou um subconjunto reduzido de alternativas potencialmente ótimas.

Caso o espaço de pesos resultante ainda admita mais de uma alternativa ótima, o método prevê a aplicação da Avaliação

Holística (*Holistic Evaluation* — HE). Nessa etapa final, o decisor compara diretamente o perfil global das alternativas restantes para declarar sua preferência, viabilizando uma recomendação final robusta e alinhada com as diretrizes estratégicas declaradas.

III. Metodologia

A metodologia aplicada segue o *framework* analítico estruturado proposto por Almeida [2], o qual divide o processo decisório em três grandes fases fundamentais de forma iterativa e lógica:

A. Fase I: Estruturação do Problema

A primeira fase busca responder o "porquê", "quem" e "o quê" do problema de decisão. O framework de Almeida [2] preconiza, nesta etapa, a identificação dos atores envolvidos, a delimitação do contexto decisório e o levantamento dos objetivos e critérios relevantes, sem prescrever uma ferramenta específica de estruturação. Neste trabalho, adota-se o *Value-Focused Thinking (VFT)* [6] como apoio metodológico para esta etapa, partindo dos valores fundamentais do decisor em vez de se limitar a avaliar as alternativas imediatamente disponíveis, como ocorreria em uma abordagem tradicional baseada em alternativas (*Alternative-Focused Thinking – AFT*).

O uso do VFT permite criar uma estrutura hierárquica clara de objetivos fundamentais (o que o decisor realmente quer alcançar) e objetivos-meio (os caminhos para atingir os objetivos fundamentais). A árvore de objetivos facilita a comunicação entre especialistas e decisores e ajuda a estabelecer os critérios e suas respectivas métricas de avaliação (atributos naturais, proxy ou construídos). Por fim, o conjunto de alternativas viáveis é delimitado e a Matriz de Consequências é preenchida por meio de dados históricos e consultas a especialistas.

B. Fase II: Modelagem de Preferências

Esta fase traduz a subjetividade do decisor e o conhecimento técnico dos especialistas em parâmetros matemáticos adequados ao modelo de agregação. Como as consequências das alternativas são conhecidas de forma determinística, adotou-se o modelo compensatório aditivo baseado na Teoria do Valor Multiatributo (MAVT), cuja função de valor global é expressa por:

$$V(a) = \sum_{j=1}^{k} w_j v_j(a_j) \tag{1}$$

Onde $v_j(a_j)$ representa a função de valor marginal do critério j para a alternativa a, avaliando o desempenho local de forma normalizada no intervalo $[0, 1]$, e w_j representa a constante de escala (ou peso) associada à importância relativa do critério j, satisfazendo a condição de que $\sum w_j = 1$.

1) *Avaliação Intracritério:* Para cada critério j, define-se uma função de valor marginal $v_j(x)$ para normalizar as métricas de escalas distintas em uma escala comum de valor $[0, 1]$. Padronizou-se a ordenação lógica para que o melhor resultado viável receba o valor 1 e o pior (menos desejável) receba o valor 0, independentemente de o atributo original ser de minimização ou maximização.
2) *Elicitação Intercritério:* Consiste na determinação dos pesos ou constantes de escala. A fim de reduzir a carga cognitiva do decisor e obter uma modelagem matematicamente mais robusta com informação parcial, substituiu-se a elicitação de pesos exatos pelo método FITradeoff . O FITradeoff elicita as preferências por meio de perguntas de consequência estrita baseadas na ordenação intracritério e no conceito de valor global intercritério, limitando o espaço de pesos viáveis iterativamente até que uma recomendação robusta seja alcançada.

C. Fase III: Avaliação e Recomendação

Na fase final do *framework*, as informações intracritério e intercritério são agregadas para a avaliação das alternativas viáveis. Como adotou-se a elicitação por informação parcial, esta etapa ocorre de forma iterativa, apoiada por programação linear.

1) *Análise de Dominância:* Antes de aplicar qualquer parâmetro de peso, realiza-se um filtro inicial lógico para eliminar alternativas estritamente ineficientes (dominadas). Uma alternativa *A* domina *B* se o desempenho de *A* é pelo menos igual ao de *B* em todos os critérios, e estritamente melhor em pelo menos um. Alternativas dominadas são excluídas do modelo para evitar processamento matemático desnecessário e distorções lógicas.
2) *Avaliação Global via Informação Parcial:* Utilizando as restrições do espaço de pesos geradas pelas respostas do decisor no FITradeoff, o algoritmo de programação linear computa os limites de valor global (mínimo e máximo) possíveis para cada alternativa. As alternativas que não conseguem atingir o maior valor global sob nenhuma combinação viável de pesos são gradativamente eliminadas. Se, ao fim das perguntas de preferência estrita, o espaço de pesos ainda permitir mais de uma alternativa potencialmente ótima, aplica-se a Avaliação Holística (*Holistic Evaluation* - HE). Na HE, o decisor analisa diretamente a Matriz de Consequências entre as finalistas e declara sua preferência final com base no *trade-off* global percebido.
3) *Análise de Sensibilidade:* Avalia-se a estabilidade e a robustez da recomendação matemática. Diferente de abordagens focadas em risco que utilizam "estados da natureza"estocásticos, a análise de sensibilidade em modelos estritamente compensatórios (MAVT) foca na verificação das fronteiras do modelo. Avalia-se se pequenas imprecisões nas estimativas de desempenho técnico (variação paramétrica dos valores marginais) seriam capazes de alterar a recomendação ótima obtida na etapa anterior.
4) *Recomendação:* Consiste na consolidação da alternativa matematicamente mais robusta, perfeitamente alinhada ao sistema de valores do decisor, culminando na formulação do plano estratégico e nas diretrizes para o gerenciamento de ciclo de vida e transição da frota.

IV. Aplicação do Modelo e Resultados

A. Estruturação do Problema (Fase I)

O problema foi estruturado com base nos dados reais coletados pelo grupo de trabalho no âmbito do Comando da Aeronáutica. Os objetivos fundamentais e os critérios correspondentes são detalhados na Tabela II.

O problema possui caráter decisório individual e centralizado. O decisor primário é o Comandante da Aeronáutica, responsável pela deliberação final sobre a estratégia de gestão

da frota. O processo decisório é assessorado por múltiplos atores de alta especialização: o Estado-Maior da Aeronáutica (EMAER), responsável pelo planejamento estratégico de longo prazo; o Comando-Geral de Apoio (COMGAP) — auxiliado pela Diretoria de Material Aeronáutico e Bélico (DIRMAB) — encarregado da logística e manutenção das plataformas; e o Comando de Preparo (COMPREP), focado na doutrina de emprego operacional e adestramento das tripulações.

Adicionalmente, chefes de seções logísticas e comandantes de esquadrões operacionais exercem pressão técnica decorrente da obsolescência percebida no dia a dia, enquanto a indústria nacional de defesa e as tripulações de voo são diretamente afetadas, embora sem poder decisório formal. Sob a ótica externa, o Ministério da Defesa (MD) atua gerenciando o orçamento global disponível, impondo restrições macroeconômicas de controle fiscal.

A aplicação do VFT iniciou-se pela elicitação dos valores fundamentais do decisor, conduzida por meio de consultas aos especialistas do EMAER, COMGAP e COMPREP. A partir desses valores, derivaram-se os objetivos fundamentais e, posteriormente, os critérios de avaliação e suas respectivas métricas. A Fig. 1 apresenta a árvore de objetivos resultante desse processo.

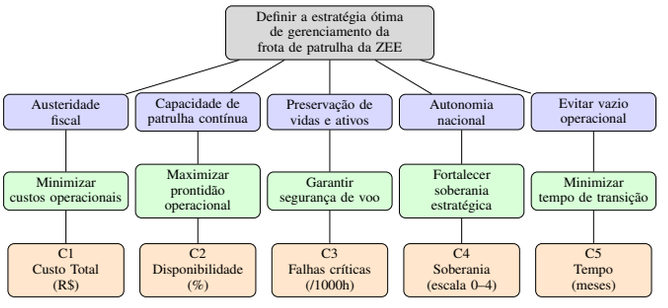


Fig. 1. Árvore de objetivos derivada do processo VFT

As alternativas identificadas para a frota de patrulha da ZEE são:

- A_1 (*Status Quo* / Manter Atual): Manter a frota atual até a falha operacional definitiva de todas as células. Caracterizada por custos logísticos insustentáveis devido à escassez de suprimentos no mercado de aviação de defesa e baixa segurança ativa e passiva.
- A_2 (Modernização – *MLU*): Realizar uma atualização de meia-vida com sensores modernos de radar de abertura sintética (*SAR*) e revitalização estrutural, terceirizando parte da manutenção básica para a indústria nacional de defesa.
- A_3 (Substituição Imediata): Aquisição imediata de uma nova plataforma de patrulha importada de última geração através de processos internacionais de compra militar direta.

Os cinco critérios foram definidos a partir dos objetivos fundamentais identificados no processo de estruturação e refletem os valores centrais do decisor:

- C_1 – Custo mede o custo total acumulado, em reais, projetado para cada alternativa ao longo do período de transição considerado, incorporando, de forma consolidada, os custos de aquisição ou modernização da plataforma, os gastos diretos de manutenção e os custos logísticos associados à aquisição de peças e contratação de serviços especializados. Por tratar-se de um critério de minimização, menores valores indicam maior eficiência orçamentária.
- C_2 – Disponibilidade representa o percentual de aeronaves da frota em condições de emprego operacional imediato. É o principal indicador de prontidão da frota para o cumprimento das missões de patrulha da ZEE e foi definido como critério de maximização.
- C_3 – Falhas Críticas quantifica o número de ocorrências de falhas com potencial de comprometer a segurança da aeronave ou da missão por mil horas de voo. Como critério de minimização, reflete diretamente o nível de confiabilidade e segurança de voo de cada alternativa.
- C_4 – Soberania avalia, por meio de uma escala construída de 0 a 4, o grau de autonomia estratégica e tecnológica propiciado por cada alternativa à FAB e à indústria nacional de defesa, considerando também a capacidade dissuasória e a capacidade operacional associadas a cada opção. Valores mais altos indicam maior independência em relação a fornecedores estrangeiros, maior capacitação da base industrial de defesa nacional e maior poder dissuasório no contexto do Atlântico Sul.
- C_5 – Tempo de Implementação mede, em meses, o prazo necessário para que cada alternativa atinja plena capacidade operacional. Como critério de minimização, penaliza alternativas que imponham longos períodos de transição e, consequentemente, prolonguem o risco de vazio operacional na cobertura da ZEE.

Tabela II
ESTRUTURA DE OBJETIVOS E CRITÉRIOS DE DECISÃO

Objetivo Fundamentais	**Critério**	**Métrica (Atributo)**	**Direção**
Economia de Recursos	Custo (C_1)	Custo total acumulado no ciclo de transição em R$ (Natural)	Min
Prontidão Operacional	Disp. (C_2)	% de aeronaves prontas (Natural)	Max
Segurança de Voo	Falhas (C_3)	Falhas críticas / 1000h (Natural)	Min
Soberania Estratégia	Soberania (C_4)	Escala Subjetiva 0 a 4 (Construído)	Max
Celeridade de Implementação	Tempo (C_5)	Tempo de Implementação em meses (Natural)	Min

A Matriz de Consequências exemplificativa levantada pelos especialistas do COMGAP, EMAER e COMPREP é apresentada na Tabela III.

Tabela III
MATRIZ DE CONSEQUÊNCIAS DO PROBLEMA

Alternativa	**Custo** (C_1)	**Disp.** (C_2)	**Falhas** (C_3)	**Soberania** (C_4)	**Tempo** (C_5)
A1 (Status Quo)	500 M R$	45%	12	1	0
A2 (Modernizar)	300 M R$	75%	4	3	18
A3 (Substituir)	900 M R$	90%	1	4	36

Nota: O custo da alternativa (500 M R$) refere-se ao custo acumulado projetado para manter a frota obsoleta em voo por um curto período de transição de cinco anos. Este custo supera o custo de modernização (300 M R$) devido às ineficiências logísticas massivas, à necessidade de importação de peças em

caráter de urgência e à contratação de serviços de engenharia caros para contornar a descontinuidade de peças por parte da fabricante original.

B. Modelagem de Preferências (Fase II)

Esta fase traduz o conhecimento técnico e a subjetividade do decisor em parâmetros matemáticos para o modelo de agregação aditivo da MAVT. Para garantir a clareza metodológica, o processo foi dividido em duas etapas independentes.

1) Avaliação Intracritério (Funções de Valor Marginal): Para cada um dos cinco critérios, estabeleceu-se uma função de valor marginal linear $v_j(x)$ para normalizar as métricas em uma escala comum de 0 a 1. A pior consequência viável do problema atua como a âncora inferior ($v_j = 0$) e a melhor consequência como a âncora superior ($v_j = 1$). A conversão das consequências da Tabela II em valores marginais foi calculada analiticamente conforme as equações abaixo:

- Custo (C_1): $x \in [300, 900]$. Critério de minimização:

$$v_1(x) = \frac{900 - x}{900 - 300} \tag{2}$$

- Disponibilidade (C_2): $x \in [45\%, 90\%]$. Critério de maximização:

$$v_2(x) = \frac{x - 45}{90 - 45} \tag{3}$$

- Falhas Críticas (C_3): $x \in [1, 12]$. Critério de minimização:

$$v_3(x) = \frac{12 - x}{12 - 1} \tag{4}$$

- Soberania (C_4): $x \in [1, 4]$. Critério de maximização:

$$v_4(x) = \frac{x - 1}{4 - 1} \tag{5}$$

- Tempo (C_5): $x \in [0, 36]$. Critério de minimização:

$$v_5(x) = \frac{36 - x}{36 - 0} \tag{6}$$

Os valores marginais resultantes para cada alternativa são sumarizados na Tabela IV.

Tabela IV
VALORES MARGINAIS NORMALIZADOS $v_j(A_i)$

Alternativa	Custo (C_1)	Disp (C_2)	Falhas (C_3)	Soberania (C_4)	Tempo (C_5)
A_1 (Status Quo)	0,67	0,00	0,00	0,00	1,00
A_2 (Modernizar)	1,00	0,67	0,73	0,67	0,50
A_3 (Substituir)	0,00	1,00	1,00	1,00	0,00

2) Elicitação Intercritério (Constantes de Escala): Com as funções de valor marginal consolidadas, passou-se à determinação das constantes de escala (k_j). Para evitar a fadiga cognitiva gerada pelo método de *trade-off* tradicional, utilizou-se o método FITradeoff sob o paradigma da informação parcial. O decisor respondeu a perguntas interativas baseadas na comparação de preferências estritas entre consequências teóricas (estruturadas a partir das âncoras calculadas na etapa anterior). Cada resposta gerou uma inequação linear, alimentando um modelo de programação linear que restringiu o espaço viável dos pesos sem a necessidade de definir valores pontuais exatos.

C. Avaliação das Alternativas e Resultados Globais (Fase III)

1) Análise de Dominância: Antes de aplicar as constantes de escala, verificou-se a dominância lógica. Diferente de modelagens preliminares, a inclusão do critério "Tempo de Implementação"evidencia que a alternativa A_1 (Status Quo) possui um tempo de implementação imediato (0 meses), superando as demais alternativas (18 e 36 meses) neste atributo específico. Logo, A_1 não é estritamente dominada e sua permanência no escopo da avaliação é matematicamente justificada para fins de *trade-off*.

2) Avaliação via FITradeoff: Os dados foram inseridos no Sistema de Apoio à Decisão FITradeoff para avaliação com informação parcial. Declarou-se linearidade nas funções de valor marginal e realizou-se a elicitação flexível. O espaço inicial de pesos estabeleceu os seguintes limites máximos para as constantes de escala: K (Falhas) = 0.79, K (Custo) = 0.50, K (Soberania) = 0.33, K (Tempo) = 0.25 e K (Disponibilidade) = 0.20.

Durante o ciclo de elicitação, o *software* computou os limites de Valor Global mínimo e máximo para cada alternativa. As faixas de valor encontradas foram: A_1 [0.14 a 0.42], A_2 [0.71 a 0.86] e A_3 [0.50 a 0.79], conforme a Tabela V. Em seguida, o decisor foi submetido à Avaliação Holística (Holistic Evaluation - HE) comparando os pares potencialmente ótimos (A_2 e A_3).

O decisor indicou estrita preferência pela alternativa A_2 sobre A_3 no contexto global. Ao inserir este julgamento no sistema, a Alternativa A_2 **(Modernizar)** consolidou-se como a única alternativa potencialmente ótima, encerrando o ciclo analítico e sendo a recomendação metodologicamente mais sólida para o problema.

Tabela V
VALORES GLOBAIS $V(A_i)$

Alternativa	Valor Mínimo	Valor Máximo)
A_1 (Status Quo)	0,14	0,42
A_2 (Modernizar)	0,71	0,86
A_3 (Substituir)	0,50	0,79

3) Análise de Sensibilidade: Para testar a estabilidade da recomendação frente a imprecisões técnicas ou volatilidades orçamentárias inerentes a projetos complexos de defesa, realizou-se um teste paramétrico focado no critério de maior variabilidade: a Disponibilidade (C_2). Como a integração de novos sistemas com plataformas legadas frequentemente impõe riscos operacionais que podem atrasar a maturidade logística, simulou-se uma degradação de 10% no desempenho previsto para a Modernização (A_2), reduzindo sua disponibilidade estimada de 75% para 67,5%.

A aplicação desta penalidade afeta diretamente a pontuação da alternativa, provocando uma redução do seu valor marginal no critério de disponibilidade de $v_2(A_2) = 0,67$ para $v_2(A_2) = 0,50$ na escala normalizada do modelo. Contudo, mesmo com esta considerável redução, o recálculo das inequações lineares no espaço de pesos do método FITradeoff demonstrou que as faixas de valor global não sofreram flutuações capazes de provocar uma inversão na ordem de preferência.

A alternativa A_2 manteve-se na primeira posição por estar protegida por um "colchão compensatório"inerente à Teoria do

Valor (MAVT). Sua excelente eficiência de custo, o menor desembolso entre as opções, garantindo o valor marginal máximo no critério de Custo ($v_1 = 1,00$), aliada ao menor tempo de paralisação em relação à substituição integral (A_3), blindaram o resultado. Conclui-se que a recomendação estratégica de modernização da frota absorve margens de erro consideráveis, provando-se altamente estável e matematicamente robusta.

4) Recomendação e Diretrizes para a Transição de Frota e Próximos Passos Operacionais: Para assegurar a viabilidade operacional e a transição suave de pessoal técnico no âmbito da FAB, a desativação da frota legada deve ser coordenada estreitamente entre o COMGAP e o COMPREP. O plano de treinamento operacional deve ser iniciado 18 meses antes da entrega da primeira aeronave modernizada (A_2). Os mecânicos de voo e sargentos especialistas devem passar por um programa intensivo de conversão técnica focado nos novos painéis digitais e no radar SAR.

Este processo de requalificação garante a transição do pessoal técnico sem a necessidade de contratação de mão de obra externa, minimizando o impacto social e aproveitando a valiosa experiência acumulada das tripulações militares. Adicionalmente, o Instituto de Fomento e Coordenação Industrial (IFI) deve ser acionado na fase inicial para conduzir o processo de certificação de aeronavegabilidade militar da plataforma revitalizada, mitigando riscos de atrasos operacionais ou embargos regulatórios.

5) Gestão de Contratos de Suporte de Longo Prazo (PBL): A sustentabilidade financeira e logística da alternativa recomendada A_2 (Modernizar) ao longo de seu ciclo de vida residual de 15 anos depende da estruturação de um contrato de suporte logístico baseado em desempenho (*Performance-Based Logistics – PBL*) com a indústria nacional de defesa. Em vez de adquirir peças sob demanda (o que gerava a ineficiência logística observada no Status Quo A_1), o COMGAP deve firmar um acordo onde a empresa parceira é remunerada com base na garantia de metas estritas de disponibilidade operacional e tempo de resposta de suprimento.

Isso alinha os interesses da indústria privada com os objetivos estratégicos da FAB, transferindo o risco de obsolescência de sobressalentes para o parceiro privado e mantendo o custo total acumulado de sustentação (C_1) estável e previsível.

V. Conclusões

A definição da estratégia de gerenciamento do ciclo de vida e transição de uma frota de aeronaves militares é um problema complexo que transcende análises simples e unidimensionais de custo-benefício. Este artigo demonstrou a aplicabilidade prática e o rigor científico do *framework* MCDA estruturado de [2] ao resolver de forma integrada o caso real da frota de patrulha e vigilância aérea da Zona Econômica Exclusiva da FAB.

A inclusão do critério "Tempo de Implementação"revelou-se um ponto de inflexão na estruturação do problema. Ao considerar o caráter imediato da alternativa de manter a frota atual (A_1), evitou-se sua eliminação sumária por dominância, evidenciando que a decisão militar não lida apenas com o "ótimo técnico", mas também com o "ótimo temporal"diante do risco de vazios operacionais. Adicionalmente, o uso do FITradeoff mitigou a carga cognitiva do decisor: por meio de respostas simples baseadas em preferência estrita sob informação parcial, foi possível construir um modelo matemático robusto sem a necessidade de fixar taxas exatas de compensação, reduzindo inconsistências em um ambiente estratégico de alta complexidade.

A análise iterativa e a Avaliação Holística demonstraram que a Modernização da frota (A_2) constitui a solução global ótima, representando o equilíbrio ideal entre a elevação da disponibilidade e da segurança de voo, a valorização da indústria de defesa nacional (Soberania) e a austeridade exigida no cenário público federal, com o menor impacto orçamentário dentre as alternativas de transição.

Por fim, a análise de sensibilidade evidenciou que, mesmo diante de potenciais atrasos ou degradações nas estimativas de disponibilidade da indústria parceira, a alternativa de Modernização permanece protegida por sua superioridade financeira e de segurança de voo, consolidando a estabilidade da recomendação.

Referências

[1] Comando da Aeronáutica, Doutrina Básica da Força Aérea Brasileira, DCA 1-1, Estado-Maior da Aeronáutica, Brasília, DF, 2024.

[2] A. T. Almeida, Processo de Decisão nas Organizações: Construindo Modelos de Decisão Multicritério, 1. ed. São Paulo: Atlas, 2013.

[3] A. T. de Almeida, J. A. Almeida, A. P. C. S. Costa, and A. T. Almeida-Filho, *"A new method for elicitation of criteria weights in additive models: flexible and interactive tradeoff"*, in European Journal of Operational Research, vol. 250, no. 1, pp. 179–191, 2016.

[4] F. J. R. Rojo, R. Roy and E. Shehab, *"Obsolescence management for long-life contracts: state of the art and future trends"*, in The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 49, no. 9–12, pp. 1235–1250, 2010.

[5] Singh, Pameet and Sandborn, Peter, *"Obsolescence Driven Design Refresh Planning for Sustainment-Dominated Systems"*, The Engineering Economist, vol. 51, no. 2, pp 115–139, 2006.

[6] R. L. Keeney, *Value-Focused Thinking: A Path to Creative Decisionmaking*. Cambridge, MA: Harvard University Press, pp. 3–30, 1992.