

Modelo Multicritério para Apoio à Escolha em Projetos de Modernização de Aeronaves

Katia Maier dos Santos

Embraer - Empresa Brasileira de Aeronáutica S.A.
Rod. Pres. Dutra, km 134 - Eugênio de Melo, São José dos Campos - SP, 12247-004
katiamaiers@gmail.com

Wagner Ferraz Castro

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo
Rua Antônio Fogaça de Almeida, 200, J. América, Jacareí-SP
wagner.castro@ifsp.edu.br

Jonatas Araújo de Almeida

Grupo de Pesquisa MAPS - Modelling and Alignment of Portfolio and Strategy, Núcleo de Tecnologia, Centro Acadêmico do Agreste, UFPE, Caruaru-PE, 55014-900, Brasil
jonatasaa@yahoo.com

RESUMO

Projetos de modernização de sistemas de defesa envolvem decisões complexas, marcadas por restrições operacionais, tecnológicas e regulatórias. Neste trabalho, propõe-se um modelo de apoio multicritério à decisão para priorização de ações frente aos riscos em programas de modernização. Foram avaliadas 22 alternativas com base em nove critérios, abrangendo aspectos como alinhamento estratégico, prontidão tecnológica e complexidade de implementação. Os pesos dos critérios foram obtidos por meio do método SMARTER, utilizando o Rank Order Centroid (ROC) a partir de uma ordenação das constantes da escala utilizada. Para analisar a robustez dos resultados, foram realizadas 10.000 repetições de uma simulação Monte Carlo com variação nos pesos dos critérios. O modelo permitiu identificar alternativas estáveis e consistentes com os objetivos organizacionais, demonstrando ser uma ferramenta útil para apoiar decisões em ambientes incertos e de alta complexidade técnica.

PALAVRAS CHAVE. Decisão Multicritério, SMARTER, Modernização de aeronaves. Tópicos (indique, em ordem de PRIORIDADE, o(s) tópico(s) de seu artigo)

ABSTRACT

Defense system modernization projects involve complex decisions, marked by operational, technological, and regulatory constraints. This paper proposes a multicriteria decision support model for prioritizing actions in response to risks in modernization programs. Twenty-two alternatives were evaluated based on nine criteria, covering aspects such as strategic alignment, technological readiness, and implementation complexity. The criteria weights were obtained through the SMARTER method, using the Rank Order Centroid (ROC) from an ordering of importance. To analyze the robustness of the results, 10,000 Monte Carlo simulations were performed with varying criteria weights. The model allowed identifying stable alternatives that are consistent with organizational objectives, proving to be a useful tool for supporting decisions in uncertain and highly complex technical environments.

KEYWORDS. Multicriteria Decision, SMARTER, Aircraft Modernization. Paper topics (indicate in order of PRIORITY the paper topic(s))

1. Introdução

Aviônicos são os sistemas eletrônicos usados em aeronaves responsáveis por comunicações, navegação e exibição e gerenciamento de múltiplos equipamentos instalados para executar funções individuais. A necessidade de adaptação ou aprimoramento constante dentro de um sistema operacional é desencadeada por vários fatores, como adaptação a novos requisitos de negócios, mudanças regulatórias e evolução tecnológica [Rajlich 2014].

Os sistemas existentes foram construídos para lidar com os requisitos de negócios na época em que foram desenvolvidos, usando estruturas de design, lógica e documentação disponíveis na época. Com a evolução de novas tecnologias, para a empresa se manter atualizada com os requisitos de negócios atuais, é necessário estar sempre estudando e pesquisando as tendências de mercado e as necessidades dos clientes.

No âmbito militar, a superioridade tecnológica é um pilar estratégico [Hanlon 1986], tornando a modernização de plataformas legado essencial para manter vantagem em cenários de conflito. Por isso, a modernização busca aumentar a segurança operacional, resolver obsolescências e ampliar capacidades estratégicas de missão sem comprometer desempenho.

Sistemas legados são aqueles que ainda atendem às necessidades para as quais foram originalmente projetados, mas não permitem crescimento. E, embora ainda funcionais, foram projetados para realidades técnicas e operacionais passadas e sua manutenção gera custos crescentes - financeiros, de reputação e operacionais. Quanto mais tempo um sistema de baixo desempenho estiver em execução, mais risco ele cria e mais recursos as empresas podem ter que dedicar para mantê-lo funcionando [Comella-Dorda et al, 2000]. A modernização surge como alternativa para estender vida útil e integrar novas tecnologias, aproveitando o conhecimento embarcado que já existe na plataforma, maximizando os benefícios de custo e cronograma.

Empresas privadas que desejam modernizar sistemas legados, especialmente se tratando de sistemas críticos, precisam atender objetivos como prazos, benefícios operacionais e ter alto controle dos riscos. Um exemplo é [Duren, 2006], que explora algumas opções para aprimorar sistemas aviônicos legados, considerando desde pequenas modificações até completamente substituir o sistema. Assim, a adoção de um método de decisão multicritério oferece uma abordagem estruturada e quantificável para gerenciar riscos técnicos e operacionais. A utilização deste método permite avaliar alternativas, equilibrando custos, benefícios operacionais, prazos e riscos. Além disso, o método aumenta a transparência do processo de tomada de decisão, visto que todos os critérios são definidos e documentados. Isso é um ponto importante considerando diversas áreas de uma empresa que possuem prioridades individuais conflitantes, mas que desejam o mesmo objetivo em comum: ter o melhor produto. Através dessa análise, também é possível reduzir incertezas ao lidar com múltiplas variáveis, minimizando os riscos e assegurando a efetividade do investimento realizado.

O presente trabalho propõe um modelo de apoio à decisão para priorizar ações relacionadas ao gerenciamento de risco técnico-operacional no contexto da modernização de sistemas críticos. O método SMARTER foi adotado para estruturar a avaliação multicritério de diferentes alternativas, considerando critérios estratégicos, técnicos, regulatórios e operacionais. A decisão modelada consiste em identificar quais riscos devem ser mitigados, aceitos ou evitados, com base em um processo estruturado de priorização das alternativas. O objetivo é fornecer subsídios que permitam decisões mais robustas e alinhadas às necessidades do projeto.

O restante deste trabalho está estruturado da seguinte maneira. A seção 2 apresenta um referencial teórico sobre Análise de Decisão Multicritério e Modernização de sistemas críticos de gerenciamento de riscos. A seção 3 apresenta o modelo, incluindo os critérios utilizados e as alternativas consideradas. Já a seção 4 apresenta os resultados que foram obtidos a partir do modelo e, finalmente, a conclusão.

2. Referencial Teórico

2.1 Análise de Decisão Multicritério (MCDA)

A análise de decisão multicritério (MCDA) é uma abordagem voltada para situações em que múltiplos objetivos ou critérios precisam ser considerados de maneira simultânea. Em contraste com métodos que procuram sintetizar problemas em um único objetivo, a MCDA reconhece a presença de múltiplas dimensões relevantes para a decisão e organiza o processo de avaliação a partir dessa multiplicidade [Belton e Stewart 2002]. Essa característica torna a MCDA apropriada para problemas de decisão em ambientes organizacionais, técnicos e públicos.

[Roy 1996] descreve a MCDA como um processo de apoio e não de substituição da decisão. A utilização dessa abordagem busca promover maior compreensão sobre as alternativas em análise, ampliando a transparência nas escolhas e explicitando os trade-offs entre critérios. O foco recai na construção de recomendações baseadas em preferências, permitindo que os decisores compreendam melhor as consequências de suas escolhas.

A definição dos critérios de avaliação ocupa posição central na construção de modelos multicritério. [Belton e Stewart 2002] apontam que a escolha inadequada de critérios compromete a representatividade do modelo e, conseqüentemente, a qualidade do apoio fornecido. A seleção de critérios relevantes e a modelagem adequada das preferências são elementos apontados por [De Almeida 2013] como determinantes para que o processo produza resultados consistentes e aderentes aos objetivos da decisão.

Outro ponto relevante destacado na literatura é a importância da participação dos stakeholders na estruturação do problema e na definição das preferências. O envolvimento direto dos interessados contribui para aumentar a aceitação dos resultados e a legitimidade das decisões [Roy 1996]. Modelos participativos também auxiliam na identificação de valores que nem sempre são capturados apenas por análises técnicas, integrando diferentes perspectivas no processo.

A MCDA também favorece a realização de análises de sensibilidade, permitindo examinar como mudanças nos pesos dos critérios ou nas avaliações das alternativas podem afetar a recomendação final. A aplicação sistemática dessa prática amplia a confiança nos resultados obtidos e possibilita que os decisores compreendam os limites de robustez de suas escolhas [Belton e Stewart 2002].

2.2 Modernização de Sistemas Críticos e Gerenciamento de Riscos

A modernização de sistemas críticos é um processo que busca garantir a continuidade operacional e a evolução funcional de sistemas essenciais a organizações públicas e privadas. Sistemas classificados como críticos são aqueles cujo funcionamento contínuo é vital para a manutenção de serviços estratégicos ou operações sensíveis, e, por isso, não podem ser descontinuados ou atualizados sem planejamento estruturado. De acordo com [Sommerville 2011], a evolução de software e sistemas críticos é um processo contínuo, impulsionado por mudanças tecnológicas, novos requisitos operacionais e a necessidade de adaptação a ambientes em transformação.

A manutenção e a modernização desses sistemas implicam desafios técnicos e organizacionais consideráveis. [Rajlich 2014] observa que a evolução de sistemas não é apenas inevitável, mas também complexa, pois envolve a integração de novos elementos em arquiteturas frequentemente baseadas em tecnologias desatualizadas. A manutenção adaptativa e perfectiva, conforme descrita na norma ISO/IEC 14764 [ISO/IEC 14764 2006], requer processos sistemáticos de análise de impacto, planejamento de alterações e gerenciamento de riscos, a fim de minimizar a probabilidade de falhas durante a implementação de mudanças.

A introdução de novas tecnologias em sistemas críticos aumenta o risco técnico-operacional, especialmente no que diz respeito à interoperabilidade entre componentes antigos e novos. [Hanlon 1986] destaca que a resistência organizacional e a falta de políticas claras de modernização podem agravar esses riscos, gerando atrasos, aumento de custos e vulnerabilidades operacionais. A ausência de uma abordagem estruturada de gerenciamento de riscos tende a comprometer a eficácia dos processos de modernização, expondo as organizações a falhas que podem ter impactos severos sobre a continuidade dos serviços.

A gestão de riscos técnicos associados à modernização requer a identificação, avaliação e priorização de fatores críticos, como a obsolescência tecnológica, a disponibilidade de competências técnicas internas e a complexidade dos sistemas envolvidos. [Sommerville 2011] sugere que a decisão entre manter, evoluir ou substituir um sistema crítico deve ser baseada na análise do custo de manutenção versus o custo e o risco da substituição. Essa avaliação demanda a consideração simultânea de múltiplos critérios técnicos, econômicos e organizacionais, o que reforça a necessidade de modelos de apoio à decisão estruturados.

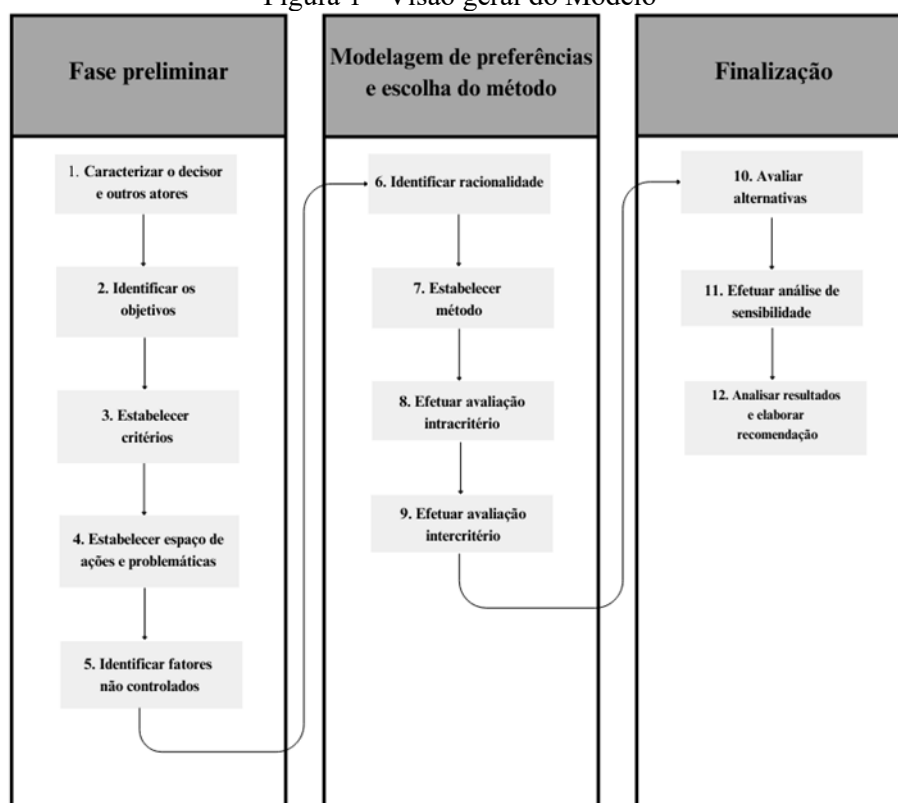
Por fim, a modernização de sistemas críticos deve ser entendida como uma atividade estratégica e contínua, e não como uma ação pontual. A utilização de processos sistemáticos de apoio à decisão, alinhados com boas práticas estabelecidas em normas internacionais, amplia a transparência e a robustez das escolhas realizadas. Nesse contexto, o uso de metodologias de análise multicritério para priorização de ações de mitigação de riscos se apresenta como uma abordagem adequada para apoiar organizações na condução de processos de modernização de maneira estruturada e orientada a objetivos.

3. Descrição do Modelo

A proposta de metodologia apresentada neste trabalho busca oferecer uma estrutura genérica e adaptável para apoiar decisões em projetos de modernização de sistemas críticos. Organizações que enfrentam o desafio de modernizar plataformas tecnológicas maduras, como aeronaves, veículos militares ou sistemas navais, frequentemente lidam com incertezas técnicas, restrições orçamentárias e expectativas.

O modelo proposto para apoiar a priorização de ações de gerenciamento de risco está estruturado em três fases principais: fase preliminar, modelagem de preferências e escolha do método, e finalização. A organização dessas etapas segue a adaptação do processo apresentado por [De Almeida 2013], conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 1 - Visão geral do Modelo



Fonte: Adaptado de De Almeida [2013].

A fase preliminar compreende cinco etapas: caracterizar o decisor e os atores envolvidos, identificar os objetivos, estabelecer os critérios de avaliação, definir o espaço de alternativas e problemáticas, e identificar fatores não controláveis. Essas etapas têm o objetivo de construir uma base consistente para a modelagem de preferências e a avaliação subsequente das alternativas.

Nesse contexto, os principais atores envolvidos na tomada de decisão são os gestores do programa, engenheiros de sistemas e engenheiros especialistas representantes de áreas específicas. Os objetivos considerados podem desde abranger a ampliação da vida útil da plataforma, garantia de interoperabilidade entre sistemas até adequação a normas internacionais. As alternativas avaliadas para esse caso geralmente incluem ações como substituições de sistemas, atualizações de software, reengenharia de arquitetura ou postergamento ou terceirização de certas atividades.

Na fase de modelagem de preferências e escolha do método, procede-se à identificação da racionalidade do decisor, considerada compensatória neste trabalho. Essa racionalidade justifica a escolha do método SMARTER (Simple Multi-Attribute Rating Technique Exploiting Ranks), que utiliza a ordenação dos critérios de acordo com sua importância e o cálculo dos pesos por meio da técnica Rank Order Centroid (ROC) [Edwards e Barron 1994].

Inicialmente, realiza-se a avaliação intracritério, com a normalização dos desempenhos das alternativas em cada critério, utilizando a Equação 1:

$$v_j(x_{ij}) = \frac{x_{ij} - \text{Pior } x_j}{\text{melhor } x_j - \text{Pior } x_j}. \quad (1)$$

em que $v_j(x_{ij})$ representa o valor normalizado da alternativa i no critério j .

Para avaliação intercritério, é efetuado o processo de definição dos pesos dos critérios, que começa com procedimento da primeira parte do *swing* para obter a ordem de importância. Em seguida, é aplicado o *Rank Order Centroid* (ROC), conforme Equação 2, para transformar a informação de ordem dos critérios em pesos.

$$w_j = \frac{1}{n} \sum_{z=j}^n \frac{1}{z} \quad \text{para todo } j = 1, \dots, n. \quad (2)$$

onde w_j é o peso atribuído ao critério j , n é o número total de critérios. A fase de finalização é composta por três etapas: avaliação das alternativas, análise de sensibilidade e elaboração da recomendação. A avaliação final de cada alternativa é realizada por meio da agregação aditiva dos desempenhos normalizados ponderados pelos respectivos pesos dos critérios, conforme a Equação 3:

$$v(x_i) = \sum_{j=1}^n w_j v_j(x_{ij}). \quad (3)$$

em que $v(x_i)$ representa o valor global associado à alternativa i calculado pela Equação 2.

A estruturação descrita permite que o processo de apoio à decisão seja conduzido de maneira sistemática, clara e alinhada aos interesses dos stakeholders, conforme defendido por De Almeida [De Almeida 2013].

4. Aplicação do Modelo

O estudo de caso foi desenvolvido pensando em uma empresa de engenharia no setor de defesa e segurança, responsável pela modernização de aeronaves militares, que deseja realizar a

gestão de riscos técnicos e operacionais frente a demandas complexas de atualização de sistemas críticos. Nesse cenário, o modelo proposto age como uma ferramenta decisória para apoiar a equipe de design integrado de produto na avaliação estruturada dos riscos associados à modernização, garantindo que o projeto ande de maneira a minimizar atrasos e custos.

O problema de decisão abordado neste estudo consiste em priorizar alternativas de ações para o tratamento de riscos técnicos e operacionais associados à modernização de sistemas críticos de aeronaves militares. Utilizando critérios técnicos, econômicos e estratégicos, o modelo busca classificar as ações segundo sua necessidade de aceitação, mitigação ou evasão, apoiando as decisões da equipe de engenharia de produto.

A aplicação do modelo inicia com a Fase Preliminar de Definição dos Critérios, tendo como decisores principais o diretor de engenharia e o gerente do programa, e como partes interessadas (stakeholders) e os engenheiros de diversas áreas (sistemas, software, certificação, testes etc). Os critérios foram estabelecidos com base nos desafios técnicos e operacionais de projetos em sistemas críticos.

Cada critério foi selecionado para refletir os aspectos mais críticos do processo de modernização, incluindo maturidade tecnológica, complexidade de integração, capacitação da equipe e conformidade com padrões internacionais, sempre considerando os impactos na prontidão operacional. Eles foram identificados baseados em revisão da literatura especializada em gestão de riscos técnicos, tomada de decisão multicritério, como [Marle et al, 2012] e modernização de software considerando tanto a adequação à maturidade organizacional quanto às preferências dos tomadores de decisão.

Os critérios são os seguintes:

1. **Atraso em Cronograma (AC):** Esse critério mede o atraso do projeto, considerando margens e dependências entre etapas. É essencial para garantir a previsibilidade do projeto e evitar custos adicionais, garantindo que os objetivos sejam alcançados dentro do prazo planejado. Esse é um critério de minimização, no qual os valores das alternativas variam de um atraso insignificante menor que 5% do prazo total a um atraso crítico maior que 30%.
2. **Atraso de Fornecedores (AF):** Essencial para reduzir os riscos da cadeia de suprimentos, esse critério leva em consideração os riscos associados a fornecedores, ajudando a evitar impedimentos. Complexidade do produto e histórico de entregas são analisados, e além de atrasos no envio do próprio equipamento, atrasos no envio de documentação e informações relevantes também são consideradas. Trata-se de um critério de minimização, onde os valores das alternativas variam de 0% para fornecedores com ótimo histórico de entregas e múltiplas fontes de suprimento disponíveis a valores superiores a 30%, com dependência exclusiva de fornecedores sem backup e contratos frágeis.
3. **Nível de Prontidão Tecnológica (Technology Readiness Level - TRL):** Avalia o estágio de desenvolvimento da tecnologia a ser implementada, conforme a escala Technology Readiness Level (TRL 1-9) de maturidade técnica. É importante para avaliar a maturidade da tecnologia a ser implementada, reduzindo o risco de adoção de soluções prematuras que possam comprometer a confiabilidade e o desempenho do sistema. Esse é um critério de maximização, no qual o valor 1 significa princípios básicos foram definidos (TRL 1-2), 2 representa prova de conceito prática (TRL 3-4), 3 indica um protótipo totalmente funcional ou modelo representacional (TRL 5-6), 4 demonstra que a tecnologia foi testada e qualificada para ambiente real (TRL 7-8) e 5 significa que a tecnologia está comprovada em ambiente operacional (TRL 9).
4. **Capacitação Técnica (CT):** Se refere ao tempo e recursos necessários para o domínio das novas tecnologias que serão implementadas. Garante que a organização tenha capacidade de operar e manter o novo sistema, evitando a dependência excessiva de consultores externos e a sustentabilidade técnica após a modernização. Esse é um critério qualitativo de maximização, no qual 1 significa a inexistência de conhecimento prático e teórico e dependência de consultores externos, 2 significa a necessidade treinamento moderado e documentação detalhada, 3 representa apenas conhecimento teórico, mas adaptação rápida

com pouco suporte externo, 4 indica conhecimento prático mínimo e 5 significa conhecimento prático existente e consolidado na empresa.

5. **Complexidade de Implementação (CI):** Analisa a complexidade de implementação da nova tecnologia a plataforma existente, que pode incluir até reengenharia de sistemas. O objetivo é estimar o esforço necessário para integrar novos sistemas, ajudando a evitar projetos excessivamente complexos que podem gerar custos imprevistos. Esse é um critério qualitativo de minimização, no qual 1 significa integração plug-and-play sem necessidade de modificações, 2 indica adaptações simples em software, 3 representa modificações moderadas, 4 denota alterações profundas que exigem novo hardware ou atualizações de firmware e 5 significa necessidade de uma reengenharia da plataforma para atender às necessidades.
6. **Custo-benefício Econômico (CBE):** Esse critério considera os custos financeiros contra os ganhos operacionais de maneira a garantir que sejam distribuídos de maneira eficiente, maximizando o retorno do investimento. Esse é um critério quantitativo de maximização, no qual 1 indica que os custos superam claramente os benefícios, 2 é percebido como benefícios limitados em relação aos custos, 3 representa equilíbrio aceitável entre custos e benefícios, 4 denota benefícios claramente superiores aos custos e 5 significa benefícios excepcionais com custo insignificante diante do retorno.
7. **Conformidade com Normas e Acordos Internacionais (CNAI):** Verifica alinhamento com entidades internacionais (ex.: FAA, OTAN), requisitos legais e ambientais. Crucial para assegurar que o sistema modernizado cumpra as normas jurídicas e operacionais nacionais e internacionais, preservando a capacidade de operar em variados contextos. Esse é um critério qualitativo de maximização, no qual 1 reflete incompatibilidade total com requisitos regulatórios essenciais, 2 denota restrições operacionais significativas, 3 representa exigência de modificações técnicas pontuais, 4 indica necessidade de ajustes mínimos e 5 significa conformidade total com todas as normas aplicáveis.
8. **Certificação e Regulamentação (CR):** Avalia prazos e dificuldades no processo de certificação, considerando inclusive possíveis readequações no processo já utilizado pela empresa. Fundamental para avaliar a viabilidade do processo de certificação, prevenindo atividades inesperadas que podem retardar a entrada em serviço da aeronave. Esse é um critério quantitativo de maximização, no qual 1 reflete readequação completa dos processos da empresa e capacitação extensiva, 2 denota mudanças significativas em sistemas ou fluxos de trabalho, com custos intermediários, 3 representa modificações moderadas em processos internos, 4 indica pequenos ajustes documentais e 5 significa adequação plena aos requisitos de certificação.
9. **Alinhamento Estratégico (AE):** Examina a demanda operacional dos clientes e competitividade industrial. A ideia é assegurar que as modernizações estejam alinhadas com as reais necessidades operacionais e com a estratégia empresarial, prevenindo investimentos em capacidades que não são demandadas pelo mercado. Esse é um critério qualitativo de maximização, no qual 1 reflete pouco alinhamento com as necessidades do mercado, 2 denota baixa relevância para as operações, 3 representa atendimento parcial às necessidades estratégicas, 4 indica maior alinhamento com as necessidades de clientes e mercado e 5 significa alinhamento total com prioridades do cliente e mercado estando de acordo com o plano estratégico da empresa.

Após os critérios terem sido estabelecidos e ordenados, considerou-se 22 alternativas nesse contexto de modernização de sistemas de defesa. Elas são divididas entre alternativas de mitigação, aceitação e escape e são elas apresentadas na Tabela 01:

Tabela 01 – Alternativas de decisão

Alternativa	Alternativa	Alternativa
A1. Substituição dos computadores de missão;	A9. Modernizar arquitetura de rede (AFDX);	A17. Automação de processos críticos da aeronave;
A2. Integração de um novo sistema de comunicação;	A10. Atualização modular dos sistemas críticos;	A18. Adiamento da modernização aguardando maturidade;
A3. Modernização dos displays do cockpit;	A11. Implementação de redundância em sistemas essenciais;	A19. Monitoramento contínuo de falhas críticas;
A4. Atualização do sistema de navegação para GNSS;	A12. Reengenharia do software embarcado;	A20. Extensão da vida útil com manutenção preventiva intensiva;
A5. Aceitar interoperabilidade limitada no datalink;	A13. Treinamento intensivo das equipes técnicas;	A21. Descontinuação e substituição por solução COTS;
A6. Não fazer modernização do sistema de guerra eletrônica;	A14. Parceria com fornecedores estratégicos;	A22. Terceirização total da modernização para fornecedor externo.
A7. Atualizar software de missão para capturar medidas novas;	A15. Adoção de padrões (arquitetura) abertos;	-
A8. Aceitar manutenção manual do sistema elétrico;	A16. Integração com sistemas aliados (ex.: OTAN);	-

Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Na segunda fase, de "Modelagem de preferências e escolha do método", foi identificado que a racionalidade do decisor é compensatória e o método estabelecido foi o SMARTER, devido à racionalidade do decisor. Logo, foi desenvolvida a matriz de consequências conforme mostrado na Tabela 2, em seguida, sendo normalizada conforme a Equação 1.

A ordem das constantes de escalas dos critérios foi determinada usando o procedimento da primeira parte do *swing*. O resultado da ordenação foi a seguinte: AE > CBE > CT > CI > TRL > AC > AF > CNAI > CR.

Tabela 2 – Matriz de consequências

Alt.	AE	CBE	CT	CI	TRL	AC	AF	CNAI	CR
A1	5	4	3	4	5	10%	10%	5	5
A2	3	4	2	2	3	18%	25%	3	2
A3	4	4	4	2	4	10%	8%	4	4
A4	5	5	4	3	5	8%	8%	5	5
A5	2	4	2	1	2	20%	10%	2	1
A6	1	5	1	1	2	30%	20%	1	1
A7	5	5	5	4	5	10%	18%	5	5
A8	2	3	3	2	2	12%	15%	2	1

A9	5	4	3	5	5	10%	8%	5	4
A10	5	5	4	3	4	10%	10%	5	4
A11	4	3	5	4	4	20%	18%	4	4
A12	5	4	4	4	4	10%	6%	5	5
A13	5	5	5	2	4	5%	5%	5	5
A14	5	4	4	3	4	6%	6%	5	4
A15	5	5	3	2	5	10%	8%	5	5
A16	5	4	4	4	5	15%	18%	5	5
A17	5	5	4	5	5	6%	6%	5	5
A18	3	2	2	2	3	25%	20%	2	2
A19	4	3	4	2	4	10%	6%	4	3
A20	3	3	3	2	3	12%	18%	3	2
A21	4	5	3	2	5	6%	10%	5	5
A22	2	4	2	2	3	11%	20%	4	2

Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Em seguida, foi aplicado o método Rank Order Centroid (ROC), conforme especificado na Equação 2 e depois a agregação aditiva, conforme Equação 3. A Tabela 3 mostra os pesos dos critérios conforme a aplicação do ROC.

Tabela 3 - Pesos dos critérios (ROC)

AE	CBE	CT	CI	TRL	AC	AF	CNAI	CR
0.3143	0.2032	0.1477	0.1106	0.0828	0.0606	0.0421	0.0262	0.0123

Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

A partir da matriz de consequências normalizada e da aplicação dos pesos ROC, foi realizada a agregação aditiva dos valores para cada alternativa. O resultado gerou o ranking inicial das alternativas apresentado na tabela 04, no qual se destacam aquelas que apresentam maior alinhamento com os objetivos estratégicos e desempenho superior nos critérios avaliados. Entre as alternativas com maior valor agregado estão A13, A4 e A15, que se sobressaíram especialmente pelos elevados escores em critérios como Alinhamento Estratégico (AE), Custo-Benefício Econômico (CBE) e Nível de Prontidão Tecnológica (TRL), compondo, assim, o grupo prioritário segundo os pesos originalmente definidos.

Tabela 4 – Ranking das alternativas.

Posição	Alternativa	Posição	Alternativa	Posição	Alternativa
1	A13	9	A12	17	A20
2	A4	10	A16	18	A22
3	A15	11	A1	19	A5
4	A7	12	A3	20	A8
5	A10	13	A9	21	A18
6	A17	14	A19	22	A6
7	A21	15	A11		
8	A14	16	A2		

Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

5. Discussão dos Resultados

Para avaliar a robustez das alternativas frente à incerteza na definição dos pesos dos critérios, foi conduzida uma análise de sensibilidade por meio de simulação de Monte Carlo com 10.000 iterações. Em cada simulação, os pesos foram gerados aleatoriamente por meio de uma distribuição uniforme e, em seguida, normalizados para garantir que a soma total fosse igual a 1.

Esse procedimento permitiu capturar diferentes cenários possíveis de preferência entre os critérios, mantendo a coerência estrutural do modelo compensatório adotado.

A cada iteração, os valores previamente normalizados das alternativas foram ponderados com os pesos sorteados respeitando a ordem dos critérios previamente estabelecida, gerando uma nova agregação e um novo ranking. Ao final das simulações, foi construída uma matriz de sensibilidade que apresenta, em termos percentuais, a frequência com que cada alternativa apareceu nas dez primeiras posições, permitindo avaliar o desempenho relativo das opções ao longo de múltiplos cenários de decisão.

Os resultados consolidados podem ser observados na Tabela 4, que apresenta o ranking obtido com os pesos definidos pelo método ROC, e na Tabela 5, que sintetiza os resultados da análise de sensibilidade. A aplicação do modelo permitiu evidenciar uma hierarquia clara entre as alternativas frente aos riscos envolvidos no processo de modernização. A alternativa A13 (“Treinamento intensivo das equipes técnicas”) destacou-se como a mais robusta, mantendo a primeira colocação no ranking com os pesos originais e apresentando elevada frequência de aparição entre as primeiras posições ao longo das simulações.

Também se destacaram as alternativas A4, A7 e A15, indicando forte alinhamento com os critérios mais valorizados no modelo, como Alinhamento Estratégico (AE) e Custo-Benefício Econômico (CBE). Por outro lado, diversas alternativas não apresentaram desempenho significativo e não figuraram entre as dez melhores em nenhuma simulação, indicando baixa atratividade nos diferentes cenários simulados. A análise reforça a robustez da alternativa A13 e das demais que mantiveram desempenho consistente, o que contribui para decisões mais confiáveis mesmo diante de incertezas na atribuição dos pesos.

Tabela 5 – Matriz de sensibilidade.

Alt.	1º	2º	3º	4º	5º	6º	7º	8º	9º	10º
A13	85,04%	6,76%	3,74%	3,05%	1,06%	0,28%	0,05%	0,02%	0,00%	0,00%
A4	1,88%	43,03%	40,40%	14,62%	0,06%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
A15	6,11%	27,06%	26,37%	22,34%	12,29%	4,08%	1,04%	0,56%	0,12%	0,02%
A7	1,08%	3,51%	4,42%	10,11%	18,12%	20,61%	9,11%	9,47%	8,41%	5,97%
A10	0,00%	0,00%	0,02%	0,79%	5,99%	15,24%	29,69%	17,47%	12,49%	10,49%
A17	4,47%	12,73%	12,39%	13,91%	24,86%	15,50%	7,33%	4,24%	2,20%	1,49%
A21	1,42%	6,60%	11,53%	30,39%	22,02%	14,63%	5,76%	3,40%	2,74%	0,74%
A14	0,00%	0,31%	1,08%	3,82%	11,12%	17,42%	18,62%	23,36%	11,78%	6,49%
A12	0,00%	0,00%	0,04%	0,89%	3,08%	6,09%	11,95%	17,63%	25,92%	18,91%
A16	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,13%	0,85%	1,76%	4,04%	4,76%	7,16%
A1	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,36%	3,22%	10,60%	12,46%	16,15%	25,85%
A3	0,00%	0,00%	0,00%	0,03%	0,74%	1,61%	3,03%	5,07%	10,58%	14,38%
A9	0,00%	0,00%	0,00%	0,01%	0,07%	0,15%	0,45%	1,40%	3,22%	5,70%
A19	0,00%	0,00%	0,01%	0,03%	0,10%	0,32%	0,60%	0,88%	1,62%	2,79%

Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

6. Considerações finais

Este trabalho propôs um modelo estruturado de apoio multicritério à decisão para priorização de ações no contexto da modernização de sistemas críticos de defesa, aplicando o método SMARTER com cálculo dos pesos via Rank Order Centroid (ROC) e análise de sensibilidade por meio de simulações de Monte Carlo. O modelo permitiu avaliar e comparar 22 alternativas com base em nove critérios técnicos, operacionais e estratégicos.

A principal contribuição da abordagem reside na sua capacidade de tornar o processo decisório mais transparente, fundamentado e robusto, ao incorporar diferentes pontos de vista e incertezas inerentes à priorização de ações complexas. A análise de sensibilidade possibilitou entender a estabilidade das alternativas frente a diferentes configurações de preferências, permitindo ao decisor maior confiança nos resultados.

Como trabalho futuro, uma alternativa seria a aplicação do modelo em outros projetos de modernização, com validação empírica dos resultados obtidos, além da integração com métodos de análise de portfólio e gestão de programas. A adoção do modelo por diferentes áreas da organização também pode ampliar sua utilidade como ferramenta corporativa de governança técnica e estratégica.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Referências

ALMEIDA, A. T. Processo de decisão nas organizações: construção de modelos de apoio. São Paulo: Atlas, 2013.

BELTON, V.; STEWART, T. J. Multiple criteria decision analysis: an integrated approach. New York: Springer, 2002.

COMELLA-DORDA, S.; WALLNAU, K. C.; SEACORD, R. C.; ROBERT J. E.; A survey of Black-Box Modernization Approaches for Information Systems. Proceedings of the International Conference on Software Maintenance, 2000.

DUREN, R. W. Options for Upgrading Legacy Avionics Systems. Proceedings of the Digital Avionics Systems Conference, 2006.

HANLON, R. C. Software modernization. Air War College, Air University, 1986.

ISO/IEC 14764:2006. Software Engineering – Software Life Cycle Processes – Maintenance. International Organization for Standardization, 2006.

MARLE, F.; GIDEL T.; A Multi-Criteria Decision-Making Process for Project Risk Management Method Selection. International Journal of Multicriteria Decision Making, 2012.

RAJLICH, V. Software evolution and maintenance. Proceedings of the Future of Software Engineering (FOSE 2014), Hyderabad, India, 2014.

SILVA, D. D.; VASCONCELOS, N. V. C.; CAVALCANTE, C. A. V. Multicriteria decision model to support the assignment of storage location of products in a warehouse. Mathematical Problems in Engineering, v. 2015, p. 1-12, 2015.

SOMMERVILLE, I. Software engineering. 9. ed. Boston: Pearson, 2011.