



Análise Operacional e Engenharia Logística: Apoio à Decisão

Aplicações da meteorologia nas operações de lançamento de foguetes: uma visão geral da estruturação do problema ao processo decisório

Meteorological Applications in rocket launch operations: an overview of problem structuring to the decision-making process

Amaury Caruzzo¹, Mischel Carmen Neyra Belderrain², Gilberto Fisch³¹International Civil Aviation Organization (ICAO), Montreal/Quebec – Canadá (<http://orcid.org/0000-0001-5280-6063>)²Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos/SP – Brasil (<https://orcid.org/0000-0002-5582-4977>)³Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE), São José dos Campos/SP – Brasil (<http://orcid.org/0000-0001-6668-9988>)

Article Info

Article History:

Received	30 December	2020
Revised	15 February	2021
Accepted	21 April	2021
Available online	30 September	2021

Palavras Chave:

Meteorologia Aeroespacial
Estruturação de problemas
Análise de Decisão
Multicritério
Programa Espacial Brasileiro

Keywords:

Aerospace Meteorology
Problem structuring
Decision Analysis
Multi-criteria
Brazilian Space Program

E-mail addresses:

acaruzzo@alumni.usp.br (A. Caruzzo),
carmen@ita.br (M.C.N. Belderrain),
fisch.gilberto@gmail.com (G. Fisch).

Resumo

Para o sucesso das operações de lançamento de veículos aeroespaciais (foguetes de sondagens e/ou lançadores de satélites), as condições meteorológicas são fundamentais. Para isso, é importante diagnosticar a aplicação da meteorologia e identificar todos os impactos das condições ambientais sobre o veículo aeroespacial. Neste contexto, o objetivo deste artigo é apresentar uma visão geral da estruturação de problema e do processo decisório nas operações de lançamento de foguetes em condições de incerteza meteorológica. Foram entrevistados diversos atores do Programa Espacial Brasileiro e identificados alguns artigos na literatura com abordagens multidisciplinares; agregando as modernas técnicas de previsão do tempo probabilísticas, com os métodos de estruturação de problemas e análise de decisão. A discussão indica uma mudança de paradigma nos últimos anos, com uma maior relevância da iniciativa privada no setor aeroespacial e a busca por procedimentos mais customizados para atender novas demandas. Como considerações finais, destacada a necessidade de: estabelecer uma previsão de tempo customizada para cada missão; mapear todos dos riscos relacionados as condições ambientais e de desenvolver um sistema de suporte à decisão inovador para as operações de lançamento.

Abstract

For the successful launch of aerospace vehicles (sounding rockets and/or satellite), weather conditions are essential. Thus, it is important to analyze meteorology applications and identify the impacts of environmental conditions on the aerospace vehicle. In this context, this article's goals present an overview of the problem structuring and the decision-making process in rocket launch operations under weather uncertainty. Several stakeholders of the Brazilian Space Program were interviewed, and some articles in the literature were identified with multidisciplinary approaches; aggregating modern probabilistic weather forecasting techniques with the methods of structuring problems and decision analysis. The discussion indicates a paradigm shift in recent years, expanding private companies in the aerospace sector and searching for more customized procedures to meet new demands. As concluding remarks: establishing a customized weather forecast for each mission, mapping all the risks related to environmental conditions, and developing an innovative decision support system for launch operations.

I. INTRODUÇÃO

A meteorologia e as condições ambientais são fundamentais para as operações de lançamentos de veículos aeroespaciais, como foguetes de sondagens e/ou lançadores de satélites [3, 17]. Entretanto, a tomada de decisão em lançar (*go*) ou não lançar (*no go*) pode ser extremamente complexa, dependendo do objetivo da missão, das condições ambientais e da incerteza da informação meteorológica.

Os autores agradecem o suporte financeiro do CNPq (processo nº 142212/2011-3) e da CAPES (processo nº 14552/2013-02) e a todos os participantes e entrevistados do DCTA, IAE, CLBI, ACS e INPE pelos comentários e contribuições. No entanto, quaisquer opiniões, conclusões ou sugestões neste artigo são de responsabilidade dos autores e não refletem necessariamente os pontos de vista das instituições do Programa Espacial Brasileiro.

Como inicialmente debatido por [2, 4], para uma boa análise do processo de tomada de decisão nas missões, é necessário: a) que todos os procedimentos operacionais estejam mapeados, b) que os fatores ambientais limitantes sejam identificados, e c) que seja realizado um levantamento da situação atual da infraestrutura nos centros de lançamento, entre outros. Neste aspecto, para ampliar a segurança durante os lançamentos, é importante incorporar uma abordagem sistêmica da situação atual, considerando os riscos meteorológicos e os diversos processos na tomada de decisão durante as missões de lançamento de foguetes.

Com base na experiência em outros programas espaciais de diversos países tais como Estados Unidos da América, França, Índia, muito dos procedimentos operacionais para lançamento de foguetes já são rotineiros e contam com diversos documentos na literatura científica [12, 13, 19, 20].

Entretanto no Brasil, sistemas específicos na área de tomada de decisão sob risco no setor aeroespacial [14], em particular utilizando informação meteorológica [2, 17], ainda estão em fase de desenvolvimento. Desta forma, este artigo tem como objetivo apresentar uma visão geral da estruturação de problema e do processo decisório nas operações de lançamento de foguetes em condições de incerteza meteorológica no contexto do Programa Espacial Brasileiro. Para isso, foram entrevistados diversos atores do com experiência em meteorologia aeroespacial e identificados alguns artigos na literatura com abordagens multidisciplinares; agregando as modernas técnicas de previsão do tempo probabilísticas, com os métodos de estruturação de problemas e de análise de decisão.

II. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A. O Programa Espacial Brasileiro

O Programa Espacial Brasileiro (PEB) começou as atividades operacionais em 1965 com o lançamento do primeiro foguete de sondagem realizado no Brasil [1]. No final de 1970, o Governo Brasileiro estabeleceu a Missão Espacial Completa Brasileira, que definiu as diretrizes principais para o PEB: lançar um satélite nacional, com um foguete fabricado no Brasil e a partir de um centro de lançamento brasileiro [2, 16]. Desde então, duas Instituições de Ciência e Tecnologia têm sido fundamentais para a pesquisa e desenvolvimento (P&D) no PEB, a saber, o Instituto de Aeronáutica e Espaço – IAE (<https://www.iae.cta.br/>) na área de foguetes de sondagem (também chamado de sub-orbital) e veículos lançadores (orbital) e o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE (<http://www.inpe.br/>) no setor de satélites.

Além destas duas instituições, atualmente o Brasil mantém dois centros de lançamento de veículos aeroespaciais: o Centro de Lançamento da Barreira do Inferno (CLBI), localizado em Natal/RN e o Centro de Lançamento de Alcântara (CLA) na cidade de Alcântara/MA. Importante destacar que o IAE, o CLBI e o CLA são instituições subordinadas ao Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial – DCTA (<https://www.cta.br/>), sendo esta uma Organização Militar da Força Aérea Brasileira. É importante destacar que a política espacial no Brasil é estabelecida pela Agência Espacial Brasileira – AEB (<https://www.gov.br/aeb/>).

Nas Figuras 1 e 2, são apresentadas imagens do Centro de Lançamento da Barreira do Inferno (CLBI) e Centro de Lançamento de Alcântara (CLA), de onde são, atualmente, lançados os veículos aeroespaciais no Brasil.



Fig 1. Imagem aérea do CLBI, em Natal/RN (fonte: website do CLBI).



Fig 2. Imagem aérea do CLA, em Alcântara/MA, com o Veículo Lançador de Satélite brasileiro ao lado da Torre Móvel de Integração (fonte: Operação Salinas no CLA).

B. Meteorologia Aeroespacial

As condições e as informações ambientais (meteorológicas, oceanográficas e de clima espacial) são fundamentais em todas as fases de operação para o lançamento de veículos aeroespaciais (foguetes de sondagem, como demonstrado na Figura 3 e/ou lançadores de satélites), entre as quais se destacam:

- ✓ fase de planejamento da missão com condições climatológicas e de clima espacial
- ✓ fase de montagem/integração do veículo com acompanhamento das condições meteorológicas que podem prejudicar a estrutura do veículo;
- ✓ fase de acompanhamento do foguete na atmosfera (rastreamento e trajetória), através da previsão e observação dos ventos na atmosfera e da cobertura de nuvens;
- ✓ outras atividades de pós-lançamento, através da avaliação dos impactos das condições meteorológicas na dispersão de gases dos foguetes, ou para resgate da carga útil, como de precipitação, altura de ondas e ventos no ponto de impacto, entre outros fatores.

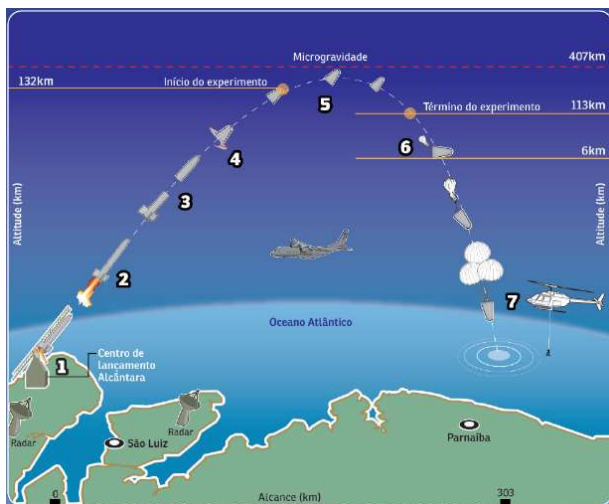


Fig 3. Ilustração de experimento de microgravidade com foguete de sondagem (fonte: adaptação Pablo Alejandro/CB/D.A Press)

Portanto, oferecer informações meteorológicas precisas para o apoio à tomada de decisão é um processo complexo e requer uma análise das condições ambientais de forma integrada, racional e objetiva [4]. Neste ponto, vale destacar que para o completo sucesso no lançamento de foguetes, diversos aspectos são fundamentais, sendo que as condições atmosféricas são relevantes na definição do momento exato da janela de lançamento [2]. Além disso, como já destacado anteriormente, outras etapas da missão de lançamento também necessitam de informações meteorológicas, tais como a montagem e preparação dos veículos. Assim, todas as atividades relacionadas às ciências ambientais e atmosféricas com impactos nas operações de lançamento de veículos são classificadas como Meteorologia Aeroespacial [20].

C. Riscos, impactos e novos procedimentos

Na última década, o setor aeroespacial está passando por uma forte transformação e ampliando significativamente a participação do setor privado [6]. Como consequência, também aumentando as possibilidades para lançamento de foguetes (diferentes modelos) por empresas privadas. Como indicado em [2, 12], esta nova dinâmica deve também estimular uma mudança nos procedimentos operacionais relacionados ao uso das condições ambientais nos lançamentos.

Por outro lado, apesar da capacidade dos modelos numéricos de previsão de tempo terem desenvolvido significativamente nos últimos anos, a aplicação de ferramentas de análise de decisão em condições de incerteza meteorológicas ainda é pouco explorada no setor aeroespacial. Além disso, de acordo com alguns trabalhos [3, 15, 17], ainda existem diversos outros fatores que não foram incorporados nos procedimentos operacionais de “go/no go” nos centros de lançamentos brasileiros, como exemplo a previsão numérica da dispersão dos gases dos foguetes ou o prognóstico de clima espacial (para lançamento de satélites).

Nesta perspectiva, exemplos dos impactos das condições ambientais nos lançamentos, como ocorrido com a missão Apollo XII [18] ou com o ônibus espacial Challenger [19], são bons indicativos que a ausência de um amplo mapeamento dos riscos meteorológicos e de um adequado sistema de suporte à decisão antecipada pode provocar sérias consequências e prejuízos consideráveis nos programas espaciais.

III. PROCESSO DECISÓRIO NOS LANÇAMENTOS

A. Estruturação do problema de decisão

Para realizar o diagnóstico ou mapeamento do uso da Meteorologia Aeroespacial no Brasil, foram realizadas 23 entrevistas estruturadas e individuais com diferentes atores do PEB, ao longo dos anos 2011-2015. Estes atores, que possuem significativa experiência em operações de lançamento de foguetes, foram divididos em três grupos distintos com o objetivo de identificar as diferentes percepções relacionadas à situação problemática, sendo:

- ✓ meteorologistas e pesquisadores em ciências atmosféricas e espaciais
- ✓ usuários diretos de informação meteorológica
- ✓ decisores da alta administração, como diretores, Chefe-da-Missão, chefes de segurança de voo, entre outros

Para analisar as entrevistas foi aplicado o *Strategic Options Development and Analysis* (método SODA) que é um Método de Estruturação de Problemas (PSM – *Problem Structuring Methods*) [7, 9]. O método SODA utiliza técnicas de mapeamento cognitivo [2], sendo hoje um dos métodos de PSM com boas aplicações em Pesquisa Operacional. Ainda conforme [7], o método SODA pode ser utilizado para analisar situações complexas ou de decisão em grupo, com o envolvimento de múltiplos objetivos, múltiplas perspectivas, vários critérios e consequências. Desta forma, é possível extrair dos entrevistados as diferentes relações dos constructos, mesmo que possuam pontos de vista idênticos. Um exemplo desta abordagem é apresentado na Tabela 1.

TABELA 1 - CONCEITOS DOS ENTREVISTADOS, COM A RESPECTIVA RELAÇÃO OPOSTA ATRAVÉS DA CONCEPÇÃO BIPOLAR. (FONTE: adaptação [2]).

Entrevistado	Conceito	Concepção bipolar
Decisor A	a informação meteorológica não é útil...	os dados estão corretos
Decisor B	a informação meteorológica não é útil...	o formato é adequado

Neste exemplo, para os dois decisores (A e B) a informação meteorológica não é útil. Ao questionar esta afirmação para ambos os entrevistados, é possível identificar o ponto de vista individual. Ou seja, identificar qual é a real demanda do decisor e o que deveria acontecer para a correta aplicação da informação meteorológica (concepção bipolar). No caso do decisor A, para a informação meteorológica ser útil é necessário que os dados estejam corretos. Já para o decisor B é necessário que a informação meteorológica esteja em um formato adequado (e.g., de fácil interpretação e/ou interpretação).

Conforme apresentado por [2], através da interação com os diversos atores e com o uso das técnicas do método SODA, foi possível identificar as preferências, os valores, julgamentos e os perfis dos usuários em relação as variáveis atmosféricas e a previsão do tempo.

Nas entrevistas, foi mapeada a situação atual do uso da Meteorologia Aeroespacial nas operações de lançamento de veículos aeroespaciais, sempre na percepção individual dos entrevistados. Durante a entrevista com os diferentes atores, também foram estimulados de forma individual para que fossem indicados quais os pontos que poderiam ser melhorados. A Figura 4 apresenta o mapa parcial com o conceito “cabeça” para todos os entrevistados (mapa agregado completo).

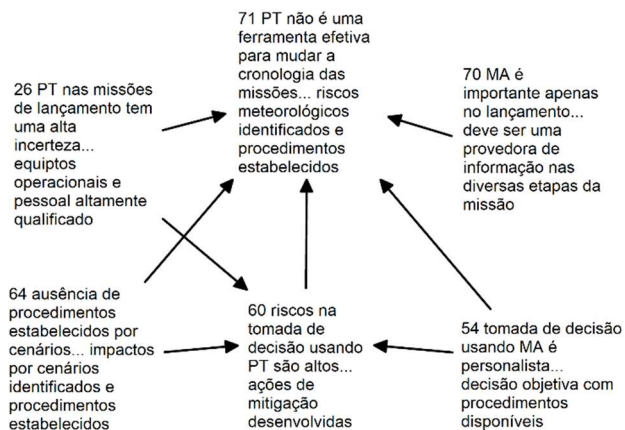


Fig 4. Conceitos dos entrevistados que convergem para a “cabeça” (71) do mapa (PT = previsão do tempo; MA = meteorologia aeroespacial). (fonte: adaptação de [2]).

Como análise principal do mapa, o primeiro diagnóstico importante é que, a Meteorologia Aeroespacial não é totalmente utilizada como uma ferramenta eficaz para a tomada de decisão durante os lançamentos de veículos aeroespaciais (conceito 71, Figura 4). Discussões mais aprofundadas e outras análises do mapeamento da meteorologia aeroespacial no Brasil podem ser encontrada em [2].

B. Decisão sob incerteza meteorológica

Outra característica relevante identificada nas entrevistas é a percepção de risco. Para o grupo de entrevistados, as condições meteorológicas são importantes, mas a tomada de decisão antecipada é fator de alto risco devido às incertezas da previsão do tempo (conceito 60, Figura 4). Ou seja, conforme discutido amplamente em [4], a atitude dos decisores tem uma relação direta em relação às características da informação meteorológica. Por exemplo, a previsão de chuva forte, com prazo de validade de 24 horas e 70% de probabilidade, possui uma expectativa de recompensa diferente em relação à mesma previsão, mas com 20% de probabilidade [10].

Como abordado em [3], o desafio do processo decisório nas operações de lançamento de foguetes sob incerteza meteorológica está em desenvolver um modelo capaz de representar as interpretações dos diferentes atores em relação ao processo decisório utilizando informações de previsão de tempo probabilísticas. Ou seja, considerando os custos e os impactos envolvidos no setor aeroespacial, um sistema de apoio a decisão nos lançamentos requer uma abordagem específica para o uso da informação ambiental nas missões.

Como também destacado por [4], o fator mais importante é a percepção dos tomadores de decisão (neste caso, o Chefe-da-Missão na operação de lançamento) sobre o valor da previsão do tempo durante todas as etapas da missão de lançamento (Figura 3), considerando 3 atributos:

- ✓ valor das variáveis (x) meteorológicas e oceanográficas
- ✓ probabilidade de previsão (p) associada a cada variável meteorológica/oceanográfica
- ✓ prazo de validade (t) da previsão do tempo

Portanto, para os decisores do Programa Espacial Brasileiro, o processo de tomada de decisão é uma função de três termos: $decisão = f(x, p, t)$, pelo qual o decisor busca compreender e converter o boletim meteorológico em uma decisão operacional [2]. Uma vez estabelecido o prognóstico da variável meteorológica (e.g., chuva), as preferências dos prazos de validade e das probabilidades na previsão são elementos chaves para compreender a decisão nos lançamentos de foguetes [3]. Por exemplo, o Chefe-da-Missão pode ter uma dúvida se a probabilidade é alta o suficiente (por exemplo, acima de 70%) e se o prazo de validade é curto o suficiente (por exemplo, menos de 10 horas) para suspender ou cancelar o lançamento (Cenário A na Figura 5).

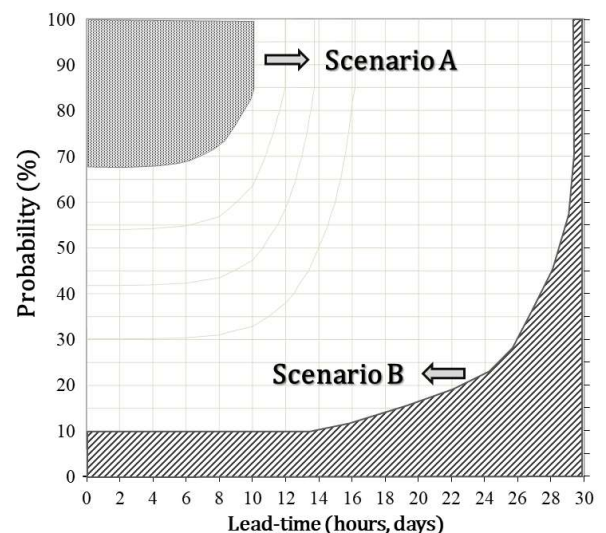


Fig 5. Conceito de previsão de tempo com alta probabilidade e curto prazo de validade [cenário A] e baixa probabilidade e longo prazo de validade [cenário B] para a mesma variável meteorológica. (fonte: adaptação de [3])

IV. DISCUSSÃO

A. Decisão antecipada baseadas nos impactos

Durante a operação de lançamento, o Chefe-da-Missão deve identificar as melhores ações de mitigação para salvar vidas humanas e/ou preservar as infraestruturas e instalações do centro de lançamento/foguete/carga útil. Considerando as informações de previsão de tempo probabilísticas [4], uma abordagem inovadora é apresentar previsão meteorológica baseada nos impactos e consequentemente nas ações a serem tomadas [3].

Por exemplo, “o cronograma de lançamento deverá ser suspenso por 6 horas”, como uma alternativa para “previsão de chuva com ocorrência de descargas elétricas”.

De acordo com este novo modelo de trabalho, algumas organizações humanitárias têm aplicado esta abordagem para facilitar o entendimento de decisores não-meteorologistas, por exemplo: “*Financiamento baseado em previsões*” [5] ou Sistema de Alertas e Decisões Antecipadas [8]. Do ponto de vista operacional, esses métodos usam níveis de impacto como um gatilho (*trigger*) para selecionar ações antecipadas. Na perspectiva do decisor, essa é uma nova maneira de personalizar produtos/serviços para antecipar medidas e adaptar a comunicação de risco com base nos impactos das condições meteorológicas para cada contexto de missão de lançamento (e.g., experimento de microgravidade, tipo de foguete, etc).

B. Sistema de Suporte à Decisão nos lançamentos

O processo decisório sob incerteza meteorológica nas operações de lançamento de foguetes é um processo subjetivo e complexo. Esta característica não é diferente de situações semelhantes em outras áreas que demandam de informações ambientais. Por exemplo, em desastres naturais, decisores escolhem ações de acordo com a experiência pessoal e percepção individual de risco [11, 21].

Aplicado ao Programa Espacial Brasileiro, a estruturação do problema permitiu identificar diversos aspectos relevantes entre os entrevistados. Como demonstrado em detalhes em [2], a previsão de tempo não altera o cronograma de missão, ou como é apresentada nos jargões operacionais de uma campanha de lançamento, a equipe é mantida guarnecida, mesmo com a previsão de condições meteorológicas desfavoráveis. De acordo com o grupo de entrevistados, as condições meteorológicas são monitoradas em tempo real, mas não existe um processo ou mesmo, um procedimento específico para auxiliar a tomada de decisão antecipada utilizando a previsão meteorológica recebida previamente.

Neste processo, a compreensão das preferências do decisor em relação as probabilidades e aos prazos de validade da previsão de tempo é também um fator essencial para o desenvolvimento de um sistema de suporte a decisão antecipada nas operações de lançamento. Ou seja, para o decisor não-meteorologista, um sistema simplificado na apresentação das recomendações facilita a interpretação dos boletins meteorológicos. Operacionalmente, este sistema de apoio à decisão auxilia também que o processo decisório seja mais dinâmico e com um intervalo de tempo reduzido, uma vez que os protocolos já poderiam ser estabelecidos. Para que a informação meteorológica seja considerada no processo decisório, é preciso avaliar a confiança do decisor na previsão e o respectivo perfil de risco.

Discussões complementares do processo decisório utilizando meteorologia aeroespacial e aplicações de estudos de casos podem ser encontradas em [3, 4].

V. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este artigo teve como objetivo, fazer uma revisão do uso da meteorologia aeroespacial como uma ferramenta no processo decisório nos lançamentos de foguetes. Através da aplicação de um método de estruturação de problema e da análise de decisão sob incerteza, foi possível identificar diversas características relevantes.

Em termos de oportunidade e recomendações para desenvolver as atividades de Meteorologia Aeroespacial no Brasil, podemos agrupar em:

- ✓ realizar um mapeamento dos todos os riscos associados as condições ambientais, com a elaboração de uma previsão de tempo específica para cada tipo de missão e veículo aeroespacial, com o desenvolvimento da previsão numérica de tempo e procedimentos específicos;
- ✓ desenvolver um sistema de apoio à decisão para auxiliar o Chefe-da-Missão nas operações de lançamento de foguetes, aplicando as modernas técnicas de decisão sob incerteza e de seleção de ações antecipadas para minimizar os impactos no caso de eventos adversos.

Além disso, considerando os desafios da iniciativa privada no setor aeroespacial, o desenvolvimento de uma abordagem inovadora se torna mais proeminente. A aplicação de um sistema de suporte à decisão meteorológico customizado pode trazer uma inovação e um dinamismo único nas decisões relacionadas aos lançamentos de foguetes no Brasil. Ou seja, a seleção das ações para mitigar os riscos e os impactos não dependeria apenas de um boletim técnico meteorológico, mas também das preferências dos decisores sobre as compensações entre probabilidade e prazo de validade da previsão de tempo e através de protocolos previamente estabelecidos.

Além dos avanços nos métodos de observações da atmosfera e dos modelos numéricos de previsão de tempo probabilísticas, a aplicação de uma abordagem multidisciplinar, utilizando as técnicas das ciências atmosféricas e dos métodos análise de decisão, demonstra ser adequada para desenvolver novos produtos e serviços no setor aeroespacial. Entretanto, é essencial que os protocolos para ações antecipadas sejam desenvolvidos e incorporados como parte dos procedimentos operacionais de um sistema de suporte à decisão nas missões de lançamento de foguetes.

Como comentário final, vale lembrar que, considerando o lucrativo mercado privado de lançamentos de foguetes com carga úteis comerciais, os centros de lançamentos que apresentarem os menores riscos associados as condições ambientais (considerando: atmosféricas, oceanográficas e de clima espacial) e com procedimentos inovadores e customizados para atender as demandas dos clientes e mitigar os impactos, apresentaram um diferencial relevante em ambiente mundial competitivo.

REFERÊNCIAS

- [1] Agência-Espacial-Brasileira, Programa Nacional de Atividades Espaciais 2012-2021. Brasília, DF: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, 2012.
- [2] A. Caruzzo, M. C. N. Belderrain, G. Fisch, and D. F. Manso, "Mapping of the aerospace meteorology in the Brazilian Space Program: challenges and opportunities to rocket launch," *J. Aerosp. Technol. Manag.*, vol. 7, no. 1, pp. 7–18, 2015, doi: 10.5028/jatm.v7i1.461.
- [3] A. Caruzzo, M. C. N. Belderrain, G. Fisch, G. S. Young, C. J. Hanlon, and J. Verlinde, "Modelling weather risk preferences with Multi-Criteria Decision Analysis for an aerospace vehicle launch," *Meteorol Appl.*, vol. 25, no. 3, pp. 456–465, 2018, doi: 10.1002/met.1713.
- [4] A. Caruzzo, M. C. N. Belderrain, G. Fisch, G. Young, C. Hanlon, and J. Verlinde, "Decisão em condições de incerteza meteorológica e proteção de infraestruturas no Centro de Lançamento de Alcântara," *Rev. Bras. Meteorol.*, vol. 32, no. 1, pp. 141–155, 2017, doi: 10.1590/0102-778632120160045.
- [5] E. Coughlan-de-Perez, B. van den Hurk, M. K. van Aalst, B. Jongman, T. Kloose, and P. Suarez, "Forecast-based financing: an approach for catalyzing humanitarian action based on extreme weather and climate forecasts," *Nat Hazard Earth Sys.*, vol. 15, pp. 895–904, 2015, doi: 10.5194/nhess-15-895-2015.
- [6] T. Devezas, F. C. L. de Melo, M. L. Gregori, M. C. V. Salgado, J. R. Ribeiro, and C. B. C. Devezas, "The struggle for space: Past and future of the space race," *Technol Forecast Soc.*, vol. 79, no. 5, pp. 963–985, 2012, doi: 10.1016/j.techfore.2011.12.006.
- [7] C. Eden and F. Ackermann, "SODA - The Principles," in *Rational Analysis for a Problematic World Revisited: Problem Structuring Methods for Complexity*, 2nd ed., J. Rosenhead and J. Mingers, Eds. West Sussex: Wiley, 2001, pp. 21–41.
- [8] F. and A. O. FAO, "Impact of Early Warning Early Action," Rome, 2018. [Online]. Available: <http://www.fao.org/emergencies/fao-in-action/ewea/en/>.
- [9] I. Georgiou, "Cognitive Mapping and Strategic Options Development and Analysis (SODA)," in *Wiley Encyclopedia of Operations Research and Management Science*, J. J. Cochran, Ed. John Wiley & Sons, 2010, pp. 1–10.
- [10] S. Joslyn and J. LeClerc, "Decisions With Uncertainty: The Glass Half Full," *Curr Dir Psychol Sci.*, vol. 22, no. 4, pp. 308–315, 2013, doi: 10.1177/0963721413481473.
- [11] T. Kox, L. Gerhold, and U. Ulbrich, "Perception and use of uncertainty in severe weather warnings by emergency services in Germany," *Atmos Res.*, vol. 158–159, pp. 292–301, 2015, doi: 10.1016/j.atmosres.2014.02.024.
- [12] F. J. Merceret, D. A. Short, and J. G. Ward, "Radar Evaluation of Optical Cloud Constraints to Space Launch Operations," *J Spacecr. Rocket.*, vol. 43, no. 1, pp. 248–251, Jan. 2006, doi: 10.2514/1.17519.
- [13] NASA, "Severe Weather Forecast Decision Aid (NASA Contractor Report CR-2005-212563)," Washington, DC, USA, 2005. [Online]. Available: <http://science.ksc.nasa.gov/amu/final-reports/severe-tool-final.pdf>.
- [14] I. C. Neto, H. C. Marques, and D. Geraldo, "Análise de colisão entre objetos espaciais," *Rev. Spectr.*, vol. 21, pp. 46–52, 2020, [Online]. Available: <https://revistaelectronica.fab.mil.br/index.php/spectrum/article/view/76>.
- [15] S. Odenwald, J. Green, and W. Taylor, "Forecasting the impact of an 1859-calibre superstorm on satellite resources," *Adv Sp. Res.*, vol. 38, no. 2, pp. 280–297, 2006, doi: 10.1016/j.asr.2005.10.046.
- [16] A. F. B. de A. Prado, "Editorial - A short history of the academic activities at the Brazilian National Institute for Space Research," *J. Aerosp. Technol. Manag.*, vol. 3, no. 1, pp. 5–12, 2011, doi: 10.5028/jatm.v3i1.86.
- [17] D. Schuch and G. Fisch, "Rocket emissions representation in atmospheric air-quality models: The short-range atmospheric transport and reaction of gases released by solid propellant engines," *Meteorol Appl.*, vol. 26, no. 2, pp. 171–181, 2019, doi: 10.1002/met.1750.
- [18] M. A. Uman and E. P. Krider, "Natural and Artificially Initiated Lightning," *Science*, vol. 246, no. 4929, pp. 457–464, 1989, doi: 10.1126/science.246.4929.457.
- [19] D. Vaughan, *The Challenger Launch Decision: Risky Technology, Culture, and Deviance at NASA*, 1st ed. Chicago: University of Chicago Press, 1996.
- [20] W. W. Vaughan and D. L. Johnson, "Aerospace Meteorology: Some lessons learned from the development and application of NASA terrestrial environment design criteria," *B Am Meteorol Soc.*, vol. 92, no. 9, pp. 1149–1157, 2011, doi: 10.1175/2011BAMS3133.1.
- [21] G. Wachinger, O. Renn, C. Begg, and C. Kuhlicke, "The risk perception paradox - implications for governance and communication of natural hazards," *Risk Anal.*, vol. 33, no. 6, pp. 1049–1065, 2013, doi: 10.1111/j.1539-6924.2012.01942.x..