

Probabilidade de Colisão e as Boas Práticas para Centros de Controle de Satélites

Luís Felipe de Moura Nohra, Gabriel Arruda Evangelista, Giuliano Freitas Batista de Oliveira
Centro de Operações Espaciais (COPE), Brasília/DF – Brasil

Resumo – O crescimento exponencial de objetos em Órbita Baixa da Terra (LEO) tem aumentado o risco de colisões entre satélites, exigindo decisões cada vez mais precisas dos Centros de Controle. Este artigo analisa os limiares operacionais da Probabilidade de Colisão (PoC) e propõe boas práticas para evitar manobras evasivas desnecessárias, preservando recursos e mantendo a segurança espacial. São discutidos critérios técnicos, abordagens baseadas em risco e o uso de inteligência artificial como ferramenta de apoio à decisão. O estudo compara valores de PoC com riscos cotidianos e referências internacionais, oferecendo diretrizes aplicáveis ao contexto brasileiro. A gestão eficiente da PoC é essencial para equilibrar segurança, continuidade de missão e sustentabilidade nas operações espaciais.

Palavras-Chave – Probabilidade de Colisão, Gestão de Riscos Espaciais, Manobra de Evasão e Centro de Controle de Satélites.

I. INTRODUÇÃO

A quantidade de satélites, partes de foguetes e detritos nas órbitas baixas da Terra (LEO, do inglês *Low Earth Orbit*) tem crescido de forma acelerada nas últimas décadas, impulsionada pela proliferação de constelações comerciais de satélites de comunicações, pelo aumento no número de lançamentos e pela permanência de objetos inativos e fragmentos resultantes de colisões ou explosões. De acordo com análises da NASA (*National Aeronautics and Space Administration*), o número total de objetos catalogados em órbita ultrapassou 29 mil em janeiro de 2025, abrangendo satélites operacionais, lançadores e detritos, cenário que evidencia o agravamento do congestionamento orbital e os riscos crescentes de colisões, conforme podemos observar na Fig. 1 [1].

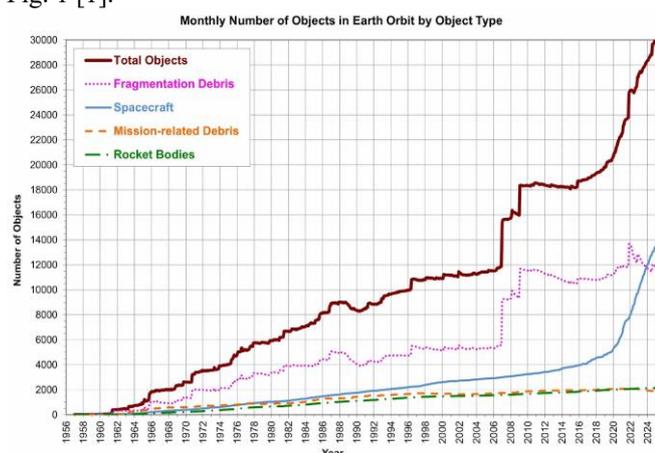


Fig. 1. Quantidade de satélites, foguetes e detritos na órbita da Terra.

Nesse ambiente cada vez mais congestionado, as manobras de evasão, conhecidas como *Collision Avoidance Maneuvers* (CAMs), são ferramentas críticas para a mitigação de riscos de colisão. No entanto, decisões precipitadas ou excessivamente conservadoras podem resultar em manobras desnecessárias,

Luís Felipe de Moura Nohra, nohralfmm@fab.mil.br; Gabriel Arruda Evangelista, evangelistagae@fab.mil.br; Giuliano Freitas Batista de Oliveira, giulianogfbo@fab.mil.br

implicando aumento no consumo de propelente, interferência na disponibilidade operacional dos satélites e complexidades adicionais no planejamento das missões [2].

Neste contexto, o aumento significativo do número de satélites em operação, somado à crescente quantidade de detritos espaciais, tem intensificado o risco de conjunções orbitais, tornando a Probabilidade de Colisão (PoC, do inglês *Probability of Collision*) um parâmetro essencial para os centros de controle. A definição de limiares adequados, contudo, exige um equilíbrio delicado: critérios demasiadamente conservadores podem resultar em manobras frequentes e desnecessárias, reduzindo a vida útil e disponibilidade das cargas úteis dos satélites, enquanto limites excessivamente permissivos elevam a exposição a riscos operacionais.

Este trabalho concentra-se na análise da PoC sob a ótica de critérios operacionais, discutindo normas internacionais, práticas já consolidadas em centros de controle e o papel de ferramentas modernas, como a inteligência artificial, no apoio à decisão. Embora aspectos estratégicos não sejam explorados em profundidade, reconhece-se que eles podem influenciar as operações reais, a depender da natureza da missão e do papel desempenhado pela carga útil do satélite. O objetivo é propor diretrizes que conciliem segurança, continuidade das missões e sustentabilidade do ambiente espacial, com foco no contexto brasileiro.

A. O Processo de Análise de Conjunções Orbitais

A análise de conjunções é um processo estruturado em quatro etapas principais, que permitem identificar, avaliar e mitigar o risco de colisão entre satélites ativos e outros objetos em órbita. Essa metodologia reflete práticas consolidadas por organizações como a NASA e pela própria experiência operacional em centros de controle.

1. **Triagem Inicial (*Screening*):** O primeiro passo consiste na identificação preliminar de conjunções potenciais a partir de efemérides operacionais e dos catálogos de objetos espaciais chamado *Special Perturbation* (SP). Algoritmos de filtragem são aplicados para verificar se dois objetos podem atingir uma proximidade significativa em determinado horizonte temporal. Essa etapa tem como objetivo reduzir o número de pares a serem analisados em detalhe, eliminando casos em que não há possibilidade de aproximação crítica como entre satélites LEO e GEO.

2. **Avaliação de Risco:** Uma vez identificados os pares candidatos, procede-se ao cálculo das métricas de risco. Historicamente, dois métodos têm sido empregados: a distância mínima prevista (*Miss Distance*, MD) e a Probabilidade de Colisão (PoC). O primeiro é simples, mas conservador, levando a alertas em excesso [18]. A PoC, recomendada pela NASA como métrica primária [17], incorpora explicitamente as incertezas orbitais por meio da

propagação das covariâncias, sendo hoje o método mais aceito pela comunidade internacional. Ainda assim, sua aplicação deve considerar fenômenos como a *probability dilution*, em que incertezas elevadas podem levar a valores artificiais de baixa PoC, criando uma falsa percepção de segurança [3, 17].

3. Melhoria das Estimativas Orbitais: Confirmada a possibilidade de aproximação crítica, torna-se necessário refinar as órbitas dos objetos envolvidos. Essa etapa é fundamental para aumentar a confiabilidade dos cálculos, pois a precisão das efemérides influencia diretamente a acurácia da PoC e do MD. No caso do satélite próprio, utiliza-se a atualização de efemérides de alta qualidade; já para objetos não controlados, é recomendável empregar sensores como radares ou telescópios para coletar dados adicionais e reduzir as incertezas [1, 13].

4. Planejamento e Execução de Manobra de Evasão: Se o risco residual permanecer acima do limiar estabelecido, procede-se à fase de manobra de evasão (*Collision Avoidance Maneuver*, CAM). Nesse estágio, as decisões devem equilibrar a necessidade de garantir a segurança do satélite com fatores como disponibilidade de propelente, impacto na missão e proximidade do TCA. A execução de uma CAM eficaz depende, portanto, não apenas da detecção da ameaça, mas da qualidade das etapas anteriores de análise.

O processo de análise de conjunções não deve ser visto como uma sequência linear e isolada, mas como um ciclo iterativo, em que cada etapa retroalimenta a seguinte. A triagem inicial reduz a complexidade do problema; a avaliação de risco fornece critérios objetivos; a melhoria das estimativas orbitais assegura a confiabilidade dos cálculos; e a manobra de evasão constitui a resposta final para mitigar ameaças confirmadas.

B. Principais Estudos sobre Colisão de Satélites

O processo de determinação de órbita (OD) não é determinístico e sua saída fornece não apenas um vetor de estado — composto pela posição e velocidade do objeto no instante de referência — mas também uma matriz de covariância que representa as incertezas associadas a essa estimativa, levando em conta erros de medição e limitações dos modelos dinâmicos. Essa matriz quantifica estatisticamente a dispersão dos vetores posição e velocidade e constitui a base matemática para análises subsequentes, como o cálculo da PoC em encontros orbitais.

Segundo Pavanello et al. [2], a decisão de manobrar um satélite considera as incertezas da dinâmica orbital, os impactos na missão e os parâmetros do satélite, como o consumo de combustível e de energia das baterias. A probabilidade mínima que motiva uma manobra varia entre 10^{-4} e 10^{-5} . A SpaceX, por exemplo, adota o valor de 10^{-5} como limite para risco de colisão e realiza, em média, cerca de 12 manobras por satélite por ano [2].

Outros autores, como Alfano [3] e Chan [4], desenvolveram métodos que utilizam elipses de incerteza derivadas da matriz de covariância, permitindo uma estimativa mais precisa da probabilidade de colisão. O método de Chan, em particular, é amplamente adotado em centros de controle devido à sua rapidez e simplicidade.

O estudo de Ravi, Zollo e Fiedler [5], do Centro Alemão de Operações Espaciais (GSOC/DLR), investiga o uso de inteligência artificial (IA) para automatizar decisões de

manobra em casos críticos, próximos à $PoC = 10^{-4}$. A partir de 200 eventos classificados por analistas, foram treinados modelos como LSTM (do inglês *Long Short-Term Memory*) e SVM (do inglês *Support Vector Machine*), que demonstraram capacidade de replicar decisões humanas com alto grau de acerto.

O diferencial da abordagem está na análise combinada de diversos parâmetros dos CDMs (sigla do inglês *Conjunction Data Message*), não se limitando apenas à PoC.

O CDM é uma mensagem padronizada que fornece dados detalhados sobre uma possível conjunção orbital entre dois objetos espaciais, incluindo informações como a PoC, distâncias mínimas previstas e incertezas associadas, sendo essencial para apoiar a análise de risco e a tomada de decisão nos Centros de Controle de Satélites.

A pesquisa mostra que a IA pode atuar como um sistema decisório confiável, aliviando a carga operacional e aumentando a segurança das operações espaciais em um ambiente cada vez mais congestionado.

Atualmente, um dos principais desafios no gerenciamento de risco orbital é a necessidade de decisões rápidas com dados limitados e, muitas vezes, com alta incerteza. Em diversos casos, mesmo quando a probabilidade de colisão é considerada baixa, a manobra é realizada por precaução, adotando-se uma postura conservadora. Embora algumas dessas ações não resultem em encontros críticos, elas aumentam a segurança da missão.

C. Comparação da Probabilidade de Colisão com Riscos Cotidianos

A decisão por manobrar o satélite não é função somente tática, pois pode impactar os serviços e diminuir a vida útil do artefato. Trata-se de uma escolha que envolve análise de custo-benefício em nível estratégico, sendo guiada por protocolos de mitigação de risco que consideram a criticidade da missão, a disponibilidade de propelente e a confiabilidade das efemérides. A avaliação da probabilidade de colisão entre satélites é um dos elementos mais críticos da Análise de Conjunção Orbital (CA – *Conjunction Assessment*) e impacta diretamente o processo decisório nos Centros de Controle.

A seguir, apresenta-se uma síntese dos principais padrões internacionais e das práticas adotadas por diferentes operadores espaciais:

TABELA I. PROBABILIDADE POR ORGANIZAÇÃO

Organização	Probabilidade	Observações
NASA	$PoC \geq 10^{-4}$	Pode iniciar planejamento de manobra.
ESA	$PoC \geq 10^{-4}$	Similar à NASA; análise via DRAMA/SODA.
SpaceX / Starlink	$PoC \geq 10^{-5}$	Limiar mais conservador devido à densidade da constelação.
Space Data Association	$PoC \geq 10^{-4}$	Referência internacional para segurança de voo.
JAXA / Japão	Avaliação contextual	Considera também o tipo de carga e fase da missão.

A interpretação dos valores de probabilidade de colisão é fundamental para orientar a tomada de decisão em nível estratégico nos Centros de Controle. Pequenas variações em escala logarítmica representam diferenças significativas em termos de risco absoluto e impacto operacional.

Assim, estabelecer faixas de referência auxilia na padronização de respostas frente a conjunções orbitais. Abaixo segue a Tabela II, com os valores típicos de PoC e sua respectiva interpretação operacional:

TABELA II. INTERPRETAÇÃO OPERACIONAL DO VALOR DE PROBABILIDADE

Ordem de Risco	Valor Numérico	Interpretação Operacional
10^{-4}	1 em 10.000	Limiar superior - manobra pode ser justificada
10^{-5}	1 em 100.000	Abaixo do limiar típico - manobra raramente justificada
10^{-6}	1 em 1.000.000	Risco muito baixo - manobra quase nunca realizada

Para contextualizar os limiares adotados na CA, é relevante compará-los com riscos amplamente tolerados na vida cotidiana. A probabilidade de colisão entre satélites em órbita baixa, quando próxima de 10^{-4} , situa-se na mesma ordem de grandeza de eventos que a sociedade aceita como parte do risco inerente às atividades diárias.

A Tabela III apresenta exemplos representativos com base em fontes oficiais:

TABELA III. PROBABILIDADE DO COTIDIANO POR ANO

Evento	Probabilidade Aproximada	Fonte
Acidente fatal de carro por ano (Brasil)	$1,2 \times 10^{-4}$	DATASUS (MS, 2023); IBGE (2022)
Acidente fatal com elevador	$1,0 \times 10^{-7}$	CPSC (2018)
Morte por raio no Brasil	$1,2 \times 10^{-6}$	INPE (2019)
Queda fatal de avião comercial	4×10^{-7}	ICAO (2022)

Observa-se que o valor de PoC = 10^{-4} , frequentemente adotado como limite superior para evasão orbital, equivale à probabilidade anual de morte em acidente automobilístico no Brasil. No entanto, ao contrário dos riscos terrestres, a mitigação de risco no ambiente espacial envolve custos operacionais relevantes, como:

- Comprometendo a vida útil do satélite;
- Geração de novas conjunções indesejadas;
- Perda de janelas de oportunidade ou interrupção de serviços críticos;
- Redução da eficiência das constelações, especialmente em sistemas de resposta rápida.

D. Considerações Técnicas e Regulatórias

De acordo com a norma ABNT NBR ISO 31000:2018, a gestão de riscos deve considerar conjuntamente a probabilidade e o impacto, utilizando critérios técnicos, operacionais e estratégicos para a tomada de decisão.

Assim, a simples ultrapassagem de um valor de PoC não determina, por si só, a necessidade de evasão. Devem ser analisados o contexto da missão, a criticidade da carga útil, a disponibilidade de propelente e a possibilidade de colapso orbital por efeito cascata (Efeito Kessler).

Como reforçado por Alfano [3], o uso de métodos probabilísticos refinados é essencial em ambientes com alta densidade de ativos espaciais.

Operadores como SpaceX, Amazon Kuiper e OneWeb já incorporam modelos baseados em estatística bayesiana e

algoritmos de aprendizado de máquina (*Machine Learning*) para melhorar a previsão de riscos e otimizar decisões em tempo quase real, minimizando manobras desnecessárias e maximizando a eficiência operacional de constelações massivas [2].

Embora os critérios técnicos e regulatórios, fundamentados em normas como a ISO 31000 e nas boas práticas de agências espaciais, forneçam a estrutura necessária para a gestão de risco orbital, sua aplicação em operações reais enfrenta limitações práticas. Fatores como janelas restritas de acesso ao satélite, incertezas significativas nas órbitas de detritos e a necessidade de decisões antecipadas tornam evidente que, além do arcabouço normativo, é essencial compreender como essas diretrizes se traduzem no ambiente operacional. Nesse sentido, a seção seguinte aborda especificamente o uso da Probabilidade de Colisão em cenários de controle, destacando tanto suas contribuições quanto suas restrições no apoio à decisão.

E. Considerações sobre o uso Operacional da Probabilidade de Colisão

A avaliação do risco de conjunções orbitais pode ser feita por diferentes métodos, sendo os mais utilizados a distância mínima prevista (*Miss Distance*) e a PoC no instante de maior aproximação (TCA). No primeiro caso, considera-se que há risco elevado sempre que a separação entre os objetos for inferior a um valor-limite predefinido. Embora simples, esse método é considerado conservador, podendo resultar em alertas e manobras desnecessárias [18].

De forma distinta, a probabilidade de colisão é calculada levando em conta a incerteza associada às órbitas, por meio da propagação das covariâncias dos objetos. Trata-se do método recomendado pela NASA:

“Collision probability is the most widely used risk metric for close approach assessment and is recommended as the primary metric by NASA” [18].

Apesar de ser amplamente adotada na indústria, essa técnica depende fortemente da qualidade dos dados de entrada e dos pressupostos assumidos nos modelos analíticos [13].

Em cenários operacionais com restrições de acesso ao satélite em LEO ou propulsão de baixo empuxo, como ocorre atualmente no Centro de Operações Espaciais (COPE), as decisões precisam ser tomadas com maior antecedência, o que aumenta a exposição às incertezas orbitais.

A utilização da probabilidade de colisão, entretanto, apresenta limitações relevantes decorrentes das incertezas orbitais. Hall demonstra em [13] que, em condições de grande incerteza nas estimativas de posição, os valores de PoC podem se aproximar de zero mesmo quando a distância mínima é reduzida, fenômeno conhecido como *probability dilution*, que cria uma falsa percepção de segurança. Alfano [3] denomina esse comportamento como a *“dilution region”*, caracterizada pelo paradoxo em que, mantendo-se constante o valor médio da distância mínima no TCA (*Time of the Closest Approach*), o aumento da variância das posições estimadas leva a uma redução da PoC. De forma semelhante, [14] destaca que esse efeito *“leads to the absurd implication that as data quality decreases, the safety of the satellites being modeled increases”* (p. 4), identificando-o como um Paradoxo de Ostrich.

Hejduk acrescenta em [17] que uma PoC baixa na região de diluição não deve ser interpretada automaticamente como indicativa de segurança, recomendando o uso de métricas complementares e representações gráficas para distinguir entre situações robustas e aquelas afetadas pela diluição. Além disso, [16] argumenta que métodos probabilísticos clássicos podem ainda incorrer no problema de excesso de confiança (*false confidence*), atribuindo elevada precisão à proposições falsas em cenários de alta incerteza. Esses aspectos evidenciam que, embora a PoC seja a métrica padrão recomendada internacionalmente, sua aplicação deve ser interpretada com cautela e apoiada por indicadores adicionais capazes de lidar com as incertezas orbitais.

Diversos trabalhos buscaram enfrentar o problema das incertezas no cálculo da PoC e, em especial, da *probability dilution*, entre eles as propostas de Elkantassi et al. [15], que aplicam testes de hipótese sobre a distância mínima (ψ), e de Lee e Lee [16], que introduzem o conceito de *Confidence Distribution* para superar a falsa confiança associada a métodos probabilísticos clássicos. Todavia, ambas permanecem em estágio de pesquisa, carecendo de maturidade para aplicação em operações reais de centros de controle. Em uma perspectiva prática, a própria [18] reconhece que tais limitações fazem parte do contexto operacional:

“Considering that about 85% of the conjunctions that a satellite actually faces cannot be addressed at all because nothing is known about them, it makes little sense that for the small number of conjunctions for which only poor data are available, large and disruptive mitigation measures should be required” [18].

Assim, a agência conclui que “it is acceptable to treat the low-PoC dilution region cases as a small extension of the untracked/uncatalogued conjunctions and not take a mitigation action” [18].

F. A operação da constelação Lessonia-1

O COPE opera a constelação Lessonia-1, composta por dois satélites de sensoriamento remoto radar, em LEO, desde março de 2025. Entre 14 de março e 4 de setembro de 2025, foram emitidos 13.871 CDMs para essa constelação, sendo 3.458 com 24 horas de antecedência e 1.739 com 12 horas em relação ao TCA. A Figura 2 mostra a distribuição de PoC para cada antecedência. Os dados foram levantados com a base operacional mantida pelo centro de operação e considera múltiplos CDMs associados a um mesmo evento.

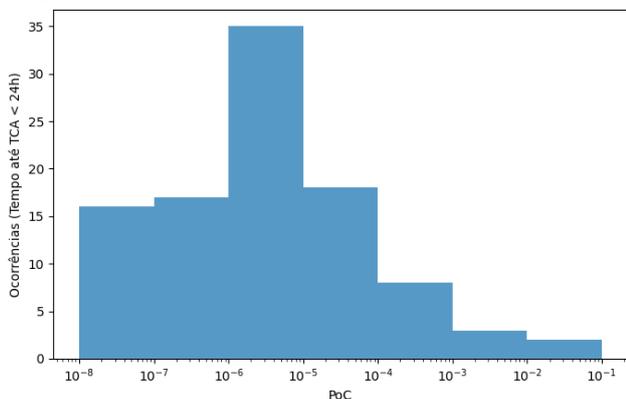


Fig. 2. Distribuição de PoC dos CDMs recebidos com antecedência menor que 24 horas até o TCA.

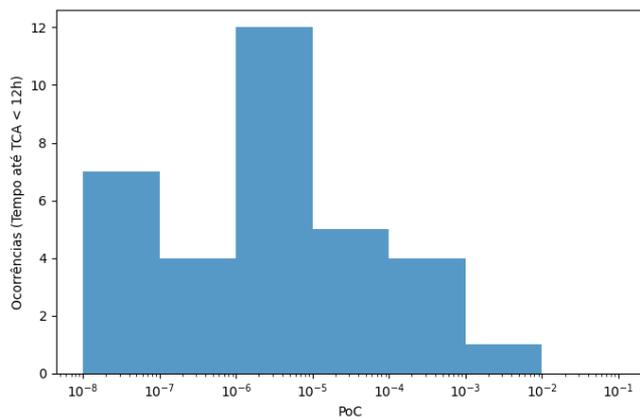


Fig.3. Distribuição de PoC dos CDMs recebidos com antecedência menor que 12 horas até o TCA.

A Figura 4 relaciona os PoCs dos CDMs com os tempos até os TCAs, incluindo os limites de risco e os períodos de antecedência. As cores representam as diferentes classificações de risco, separados pelos limites apresentados anteriormente na Tab. II. Frequentemente, o PoC de um evento evolui de modo a dispensar a manobra. Vale destacar que a operação da constelação ocorre com segmento de solo que permite apenas 3 ou 4 acessos diários por satélite, restringindo o envio de comandos para manobras. Dessa forma, as decisões são tomadas com a antecedência que essa limitação operacional impõe e alinhadas aos limites de probabilidade de colisão: os telecomandos são enviados cerca de 24 horas antes do TCA, observando-se a evolução do PoC e, quando necessário, cancelando-se a manobra tendo como limite para cancelamento o último acesso ao satélite antes do TCA.

A experiência da operação da constelação Lessonia-1 vem mostrando o desafio do tratamento do alto volume de dados e que, embora a PoC seja o principal indicador para a decisão sobre a necessidade de manobra, as restrições operacionais como baixo número de acessos aos satélites e a elevada incerteza orbital do segundo objeto envolvido nas conjunções, principalmente detritos, exigem cautela. Nesse cenário, as decisões de manobra acabam sendo antecipadas, muitas vezes antes da maturação completa das estimativas, o que reforça a necessidade de sistemas complementares capazes de rastrear e refinar as órbitas dos objetos secundários, além de ampliar o número de acessos aos satélites. Com isso, a decisão de manobrar poderia ser tomada mais próxima do TCA, de forma mais oportuna e assertiva.

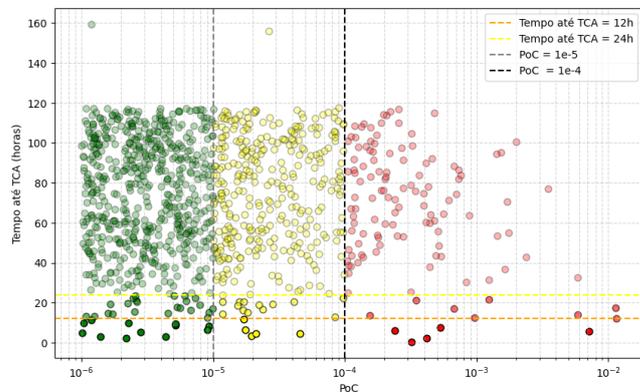


Fig. 4. Relação entre o PoC e a antecedência de recebimento do CDM.

II. OBSERVAÇÕES FINAIS

A crescente densidade de objetos em órbita baixa da Terra impõe aos Centros de Controle de Satélites o desafio de equilibrar segurança, continuidade das missões e sustentabilidade orbital. A adoção de limiares padronizados para a Probabilidade de Colisão, como o valor de 10^{-4} sugerido pela NASA e pela *Space Data Association* (SDA), oferece um ponto de partida sólido para as decisões de manobra. Contudo, a prática mostra que valores mais conservadores, como o adotado pela SpaceX (10^{-5}), podem ser mais adequados em constelações de alta densidade.

Apesar de estudos recentes indicarem que, no futuro, novos métodos poderão complementar a avaliação de risco de colisão, a PoC permanece como a métrica recomendada e aceita pela comunidade internacional, desde que apoiada em dados orbitais de alta qualidade. O desafio central, portanto, está em mitigar as incertezas que podem levar a fenômenos como a *probability dilution*, comprometendo a confiabilidade dos cálculos. Para enfrentar esse cenário, recomenda-se que Centros de Controle invistam em processos de determinação de órbita robustos, desenvolvam capacidade própria de rastreamento e refino da órbita dos objetos secundários, ou contratem serviços especializados, assegurando que os valores de PoC representem fielmente o risco real.

A experiência nacional com a operação da constelação Lessonia-1 reforça esse ponto. As limitações de acesso aos satélites e a elevada incerteza orbital dos objetos secundários exigem que muitas decisões sejam tomadas de forma antecipada, antes da maturação completa das estimativas. Esse caso evidencia a necessidade de dispor de sistemas próprios, ou de serviços especializados, capazes de refinar as órbitas dos objetos secundários envolvidos nas conjunções, bem como ampliar o número de acessos aos satélites em LEO, possibilitando decisões mais oportunas e assertivas.

Nesse contexto, ferramentas baseadas em inteligência artificial e aprendizado de máquina já demonstraram potencial para apoiar diretamente o processo decisório, automatizando a análise de grandes volumes de CDMs e replicando decisões humanas com alto grau de precisão. A integração dessas tecnologias aos procedimentos de análise de conjunção pode reduzir a carga operacional dos analistas, acelerar o tempo de resposta e ampliar a confiabilidade das avaliações, especialmente em situações críticas próximas ao limiar de decisão.

Dessa forma, ao manter a PoC como métrica central, reforçada por dados orbitais de qualidade, complementada por indicadores auxiliares e potencializada pelo uso de IA, os Centros de Controle podem alcançar decisões mais técnicas e equilibradas. Isso garante não apenas a segurança imediata das missões, mas também a continuidade operacional e a sustentabilidade de longo prazo do ambiente orbital, alinhando a prática brasileira às melhores diretrizes internacionais e fortalecendo sua contribuição para a governança global do espaço.

REFERÊNCIAS

[1] NASA. *Orbital Debris Quarterly News*, Volume 29, Issue 1, February 2025. Houston: NASA Orbital Debris Program Office, 2025. Disponível em: <https://orbitaldebris.jsc.nasa.gov/quarterlynews/pdfs/odqnv29i1.pdf>. Acesso em: 28 jun. 2025.

- [2] PAVANELLO, Zeno; DE MARIA, Luigi; DE VITTORI, Andrea; MAESTRINI, Michele; DI LIZIA, Pierluigi; ARMELLINA, Roberto. *A review of spacecraft collision avoidance manoeuvre*. *Acta Astronautica*, [S.l.], v. 212, p. 1–17, 2024. ISSN 0094-5765. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2023.117907>. Acesso em: 28 jun. 2025.
- [3] ALFANO, Sal. A numerical implementation of spherical object collision probability. *Journal of the Astronautical Sciences*, New York, v. 53, n. 1, p. 103–109, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF03546475>.
- [4] CHAN, F. Spacecraft collision probability for long-term encounters. *Advances in the Astronautical Sciences*, v. 129, p. 1243–1262, 2008. Disponível em: <https://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/6.IAC-08-A6.5.11>. Acesso em: 29 jun. 2025.
- [5] RAVI, Pavithra; ZOLLO, Andrea; FIEDLER, Hauke. *AI for Satellite Collision Avoidance – Go/No Go Decision-Making*. In: 2nd Orbital Debris Conference, 2023. German Space Operations Center (GSOC), DLR, Weßling, Germany. Disponível em: <https://www.hou.usra.edu/meetings/orbitaldebris2023/pdf/6043.pdf>. Acesso em: 29 jun. 2025.
- [6] INPE. *Relatório de Mortalidade por Raios no Brasil*. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2019.
- [7] KELSO, T.S. *Validation of Conjunction Analysis Risk Assessment Processes*. Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, 2019.
- [8] NASA. *Process for Limiting Orbital Debris (NASA-STD-8719.14B)*. 2021.
- [9] SDA. *Best Practices Guidelines for Spaceflight Safety*. Space Data Association, 2019.
- [10] ABNT. *NBR ISO 31000:2018 – Gestão de Riscos – Diretrizes*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2018.
- [11] DATASUS. *Sistema de Informações sobre Mortalidade (SIM)*. Ministério da Saúde, 2023.
- [12] IBGE. *Projeção da População Brasileira*. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2022.
- [13] HALL, D. T. *The Problem of Probability Dilution in Conjunction Assessment*. NASA Technical Report, 2019. Disponível em: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20190029216/downloads/20190029216.pdf>
- [14] Balch, Michael Scott, Ryan Martin, and Scott Ferson. "Satellite conjunction analysis and the false confidence theorem." *Proceedings of the Royal Society A* 475.2227 (2019): 20180565.
- [15] ELKANTASSI, S. et al. *Statistical Inference on Miss Distance for Space Collision Risk Assessment*. arXiv preprint, 2025. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2503.20085>
- [16] LEE, H.; LEE, Y. Confidence Distribution for Conjunction Assessment and Space Situational Awareness. *Entropy*, v. 27, n. 4, p. 329, 2025.
- [17] HEJDUK, Matthew D.; SNOW, D. E.; NEWMAN, L. K. Satellite conjunction assessment risk analysis for “dilution region” events: Issues and operational approaches. In: Space Traffic Management Conference. 2019.
- [18] F. J. Krage, “NASA Spacecraft Conjunction Assessment and Collision Avoidance Best Practices Handbook,” NASA, handbook NASA/SP-20205011318, 2020.