

Método de Apoio à Tomada de Decisão para o Gerenciamento de Alertas de Conjunção entre Objetos Espaciais

David do Espírito Santo Nogueira¹, Willer Gomes dos Santos² e Carlos Eduardo De Sá Amaral Oliveira²

¹Centro de Operações Espaciais (COMAE), Brasília/DF - Brasil

²Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos/SP – Brasil

Resumo – Este trabalho estuda os procedimentos de Prevenção de Colisão (COLA) entre satélites do Centro de Operações Espaciais (COPE) e outros objetos espaciais. As ações de prevenção diferenciam-se conforme a conjunção envolva detritos ou satélites ativos, considerando também a possibilidade de aproximações deliberadas. A metodologia inclui um estudo teórico da literatura e uma revisão técnica das práticas atuais de órgãos espaciais, como a Força Espacial dos Estados Unidos (USSF) e a Agência Espacial Europeia (ESA), adaptada à realidade do COPE. Propõe-se um fluxo de processo para apoiar a tomada de decisão da Seção de Consciência Situacional Espacial (SCSE) do COPE. Esse fluxo é composto por três etapas: triagem diária de avaliação de conjunção, avaliação de risco e mitigação de risco. Estas etapas têm como objetivo filtrar eventos que possam ameaçar os sistemas espaciais do COPE. Espera-se que esse fluxo de processo contribua para as operações do COPE, permitindo que operadores de satélites ajam de forma objetiva e segura diante de alertas de conjunção ou de condutas suspeitas.

Palavras-Chave – Conjunção, Probabilidade de Colisão, Segurança Espacial.

I. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o setor espacial se desenvolveu rapidamente e a quantidade de objetos no espaço cresceu substancialmente. Por esse motivo, é necessário aumentar o nível de Consciência Situacional do Espaço (CSE) ou, do inglês, *Space Situational Awareness* (SSA), em particular da posição dos satélites e dos detritos que estão em órbita na Terra a fim de prevenir quaisquer colisões entre esses objetos.

A Fig. 1 apresenta um gráfico da quantidade de objetos rastreados em órbita de 1957 até 2024, separando em 5 grupos: total de objetos, detritos formados já em órbita, espaçonaves ativas, detritos formados nos lançamentos e corpos de foguetes [1]. Percebe-se que, a partir da década de 2000, cresceu significativamente a quantidade de detritos em órbita, provavelmente devido à destruição do satélite inativo Fengyun-1C (FY-1C) pela China [2] e à colisão entre o satélite russo inativo Cosmos 2251 e o satélite americano operacional Iridium LLC [3]. A partir de 2019 iniciou-se um crescimento exponencial do número de objetos espaciais ativos em consequência à enorme quantidade de satélites que foram lançados com o programa Starlink [4]. Em razão de todos esses fatores, é imprescindível que haja procedimentos eficientes de operação de satélites que reduzam quaisquer riscos de colisão para um futuro espacial sustentável.

Observando, mais especificamente, no âmbito militar brasileiro, o Centro de Operações Espaciais (COPE) é um centro subordinado ao Comando de Operações Aeroespaciais

(COMAE), em que sua missão é “Empregar o Poder Aeroespacial Brasileiro com vistas a garantir a soberania do espaço aéreo brasileiro” [5]. Portanto, é coerente que o COPE assuma a função de realizar as atividades de SSA dos satélites pertencentes a qualquer órgão das Forças Armadas do Brasil. Inclusive, este centro já possui uma Seção de Consciência Situacional Espacial (SCSE) dentro de seu organograma desde 2022.

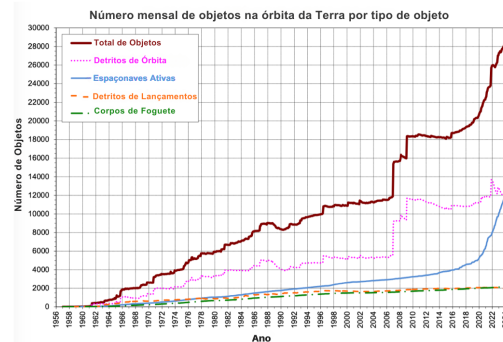


Fig. 1. Evolução da quantidade de objetos no espaço. Traduzido de [1].

Para embasar o objetivo deste trabalho, foram formuladas as seguintes questões:

- “Qual nível percentual de risco aceitável para uma conjunção envolvendo veículos espaciais do COPE?”
- “A partir de quantos dias o instante de máxima aproximação (TCA, do inglês, *Time of Closest Approach*) que o operador deve agir para mitigar os riscos de colisão?”
- “Quais critérios podem ser adotados na elaboração de um fluxo de processo com o fim de atenuar os riscos de colisão dos sistemas espaciais?”
- “Quais as formas de agir se o objeto de conjunção for detrito e quais as formas se for satélite ativo?”
- “Como agir em uma aproximação possivelmente intencional?”

Buscando responder estas questões, o objetivo geral do presente trabalho foi elaborar um procedimento detalhado de tomada de decisão pela SCSE ante uma conjunção com os satélites da Força Aérea Brasileira (FAB) nas órbitas baixa (LEO) e geoestacionária (GEO). Como consequência dos resultados de etapas do projeto foram definidos alguns objetivos específicos: entender como são as formas de mitigação de conjunção adotada por outros órgãos espaciais; elaborar ações para lidar com os riscos de colisão envolvendo qualquer satélite da FAB; estudar os procedimentos de análise de conjunção já existentes no COPE e propor um novo fluxo de processo; e criar um processo de identificação de aproximação intencional de outros satélites.

A maioria dos objetos espaciais encontram-se em órbitas baixas, o que torna comum aproximações que demandam análises individuais de cada caso. Isso deve-se ao motivo de que não é desejável que haja gasto de combustível pelo veículo espacial sem necessidade, visto que isso está diretamente ligado à vida útil do satélite, ou seja, esse ato está associado aos custos financeiros da operação. Assim sendo, é preciso estabelecer um risco aceitável que não comprometa o tempo de vida do satélite e, ao mesmo tempo, mantenha-o seguro, o que justifica o estudo de um procedimento detalhado para ser seguido, frente aos alertas. A partir disso, torna-se necessário o estudo de um procedimento detalhado para ser seguido frente aos alertas de conjunção recebidos.

O artigo está organizado da seguinte forma: a Seção II apresenta a fundamentação teórica do estudo; a Seção III discute as estratégias existentes para análise de conjunções; a Seção IV detalha a metodologia proposta; a Seção V expõe os resultados obtidos; e, por fim, a Seção VI apresenta as conclusões do trabalho.

II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Esta seção tem o intuito de apresentar os fundamentos teóricos que fornecem base para o desenvolvimento deste trabalho, de tal modo que sustente o que será discutido nas seções posteriores.

A. Consciência Situacional Espacial

Não existe um consenso geral para a definição precisa de SSA (ou CSE), porém é preciso esclarecer o que se deseja dizer ao se referir a esse termo neste trabalho. A SSA é o conhecimento da localização dos objetos naturais e daqueles produzidos pelo homem no ambiente espacial, que a *European Space Agency* (ESA) - Agência Espacial Europeia - especifica como [6]: “o fornecimento de informações precisas e oportunas sobre o ambiente espacial e particularmente sobre os perigos para a infraestrutura em órbita e no solo.”. A referência [6] lista as atividades de SSA, que são:

- Produção de catálogos dos objetos espaciais;
- Previsão de colisão em órbita e reentradas;
- Prevenção de colisões em órbita e falsas caracterizações de atividades;
- Detecção de perigos aos satélites e de novos objetos espaciais em órbita;
- Identificação dos proprietários de cada objeto, bem como suas responsabilidades;
- Monitoramento da conduta das espaçonaves; e
- Diagnóstico de falhas e mau funcionamento dos satélites.

Ainda deve-se incluir as atividades naturais que impactam a infraestrutura em solo e em órbita, que são os eventos de clima espacial e objetos próximos à Terra (NEO, do inglês, *Near-Earth Objects*), como asteroides e cometas. Inclusive, a ESA divide a SSA em três segmentos: Clima Espacial, Vigilância e Rastreamento Espacial (SST, do inglês, *Space Surveillance and Tracking*) e NEO [7], no qual pode-se observar mais detalhadamente na Fig. 2. Portanto, as atividades de SSA consistem em prever, prevenir e monitorar

todos os eventos no espaço que podem causar qualquer impacto, direto ou indireto, nas operações espaciais.

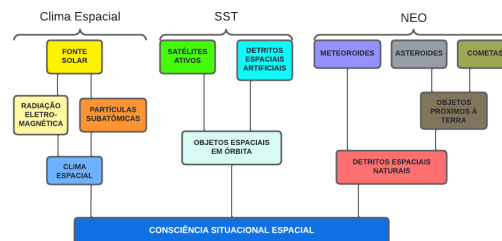


Fig. 2. Componentes relacionados com a SSA. Traduzido de [7].

B. Operação de Encontro e Proximidade

Uma Operação de Encontro e Proximidade (RPO, do inglês, *Rendezvous and Proximity Operation*), é definida como uma alteração intencional realizada na trajetória de um satélite a fim de aproximá-lo de outro objeto espacial [8]. Inclusive, algumas situações de RPOs não cooperativas criaram tensões geopolíticas. No final de 2017, foi realizada uma RPO entre o satélite franco-italiano Athena-Fidus e o satélite russo Luch (Olymp) que perdurou até o início de 2018 [9]. Para a segurança nacional, as tecnologias atuais de RPO estão permitindo capacidades adicionais para coletar dados de inteligência sobre objetos espaciais, além de conduzir operações ofensivas e defensivas [10].

III. REVISÃO TÉCNICA

Esta seção destina-se a analisar o que é executado atualmente no mundo sobre o assunto, com a devida ressalva de somente descrever informações de caráter ostensivo. As referências externas mais transparentes e completas sobre o assunto em estudo são da Força Espacial dos Estados Unidos (USSF), seguido da ESA.

A. Ações Existentes de Mitigação do Risco de Colisão

Historicamente, o risco aceitável para Prevenção de Colisão (COLA, do inglês, *Collision Avoidance*) - é, no máximo, entre 10^{-4} e 10^{-5} (1 chance entre 10 mil e 100 mil) [11], então fica a critério do Proprietário/Operador (O/O, do inglês, *Owner/Operator*) definir o valor considerado aceitável para sua operação. No caso do COPE, ainda com poucos satélites sob controle integral, é possível adotar uma Probabilidade de Colisão (P_c) menor para mitigar a ameaça, ainda que demande mais recursos. Portanto, recomenda-se que para quaisquer P_c maiores que 10^{-5} deve-se adotar alguma medida preventiva.

A COLA é o procedimento de planejar e, possivelmente, executar uma manobra orbital para mitigar o risco de colisão entre dois objetos espaciais [12]. As três partes do procedimento de COLA são:

- 1) Triagem de avaliação de conjunção (conhecida como *Conjunction Assessment* (CA));
- 2) Análise de conjunção e avaliação de riscos (conhecida como *Conjunction Analysis and Risk Assessment* (CARA)); e

3) Planejamento de mitigação de colisões.

Caso o risco de colisão seja superior ao limite definido pelo O/O, deve ser aplicada uma ação de prevenção de colisão para reduzir a P_c no TCA a um nível aceitável e sem gerar uma nova conjunção de alto risco com outro objeto. A manobra propulsiva é a solução mais aplicada para satélites equipados com propulsores [13]. Contudo, ainda existem outros meios para evitar colisões, como o uso de técnicas aerodinâmicas [14]. Uma opção é alterar a atitude do satélite e aumentar a área de arrasto na direção do movimento ou alterar a força de pressão de radiação solar. Outra alternativa é alterar a atitude do satélite próximo ao TCA, de maneira a reduzir a área de seção transversal na direção do objeto em conjunção, conhecida como “*duck maneuver*” [15]. Isso não atenua a aproximação, mas reduz a P_c entre os dois objetos, diminuindo a área de seção transversal entre eles. Vale ressaltar que o sistema automatizado de COLA implementado pela Starlink utiliza como critério para prevenção de colisão quaisquer P_c maiores que 10^{-5} [15].

B. Processo de Avaliação de Conjunção da USSF

A USSF adota um processo de CA que é utilizado no Space-Track através do manual referenciado [16]. As atividades se iniciam com as observações de satélites da *Space Surveillance Network* (SSN), que é uma rede de vigilância espacial dos EUA, em que inclui uma variedade de sensores em todo o mundo, que detectam, rastreiam, catalogam e identificam objetos artificiais em órbita da Terra. As observações SSN são inseridas no sistema de missão do *18th Space Defense Squadron* (18 SDS), que realiza a propagação de órbita. A determinação de órbita é realizada automaticamente várias vezes por dia para determinar a posição e a velocidade de cada objeto, com o intuito de atualizar o *High Accuracy Catalog* (HAC), um catálogo de alta precisão que propaga a órbita para os próximos dias considerando as perturbações espaciais (SP, do inglês, *Special Perturbations*). O método de propagação SP é normalmente usado para prever o movimento orbital durante um período de tempo relativamente limitado por métodos numéricos, em que se consideram os efeitos gravitacionais do Sol e da Lua sobre o satélite [17].

De acordo com o manual da USSF [16], os critérios para se caracterizar uma conjunção e emitir uma Mensagem de Dados de Conjunção (CDM, do inglês, *Conjunction Data Message*) ou, caso a situação seja mais urgente, é emitida uma Notificação de Aproximação Próxima (CAN, do inglês, *Close Approach Notification*). Os parâmetros adotados para a emissão de uma CDM e de uma CAN podem ser constatados na Tabela I.

TABELA I. CRITÉRIOS BÁSICOS DE NOTIFICAÇÃO AO OPERADOR. TRADUZIDO DE [17].

Método de Análise	CDM	CDM e CAN
GEO HAC e O/O	$TCA \leq 10$ dias e $d_{\min} \leq 5$ km	$TCA \leq 3$ dias e $d_{\min} \leq 5$ km
LEO HAC e O/O	$TCA \leq 3$ dias e $d_{\min} \leq 1$ km e $P_c \geq 10^{-7}$	$TCA \leq 3$ dias e $d_{\min} \leq 1$ km e $P_c \geq 10^{-4}$

Caso haja alguma conjunção, o *19th Space Defense Squadron* (19 SDS) informará o O/O e este decidirá se realizará uma COLA ou não. Se o O/O decidir realizar a prevenção, ele poderá enviar ao 19 SDS seus novos dados de efemérides para nova análise com relação ao catálogo. Esta troca de dados poderá continuar até o TCA e depois o 19 SDS retomará as atividades de rotina do satélite ativo de acordo com o cronograma de triagem. Caso não realizem a COLA, o 19 SDS continuará monitorando a conjunção e fornecendo atualizações com base nos dados do SSN até o TCA passar.

C. Parcerias Internacionais do COPE

O COPE possui algumas parcerias que contribuem diretamente no processo de COLA para seus respectivos satélites, sendo a primeira, o *SSA Sharing Agreement* [18], em que o COPE passou a ter acesso ao portal Space-Track.org, onde se encontram todas as informações de dados de órbita dos satélites coletados pelo 18 SDS. Além desta, ainda há o *Joint Commercial Operations* (JCO) [19], no qual sua missão é fornecer a identificação, análise e alerta oportunos e precisos de possíveis atividades espaciais suspeitas, valendo-se das capacidades da indústria e de aliados, em nível ostensivo, a fim de permitir a máxima distribuição e colaboração, em apoio aos objetivos operacionais e estratégicos [20]. Também existe outra iniciativa interessante que o COPE se afiliou, o *EU Space Surveillance and Tracking* (EU SST), que é um programa de vigilância e rastreamento de objetos espaciais do programa espacial europeu. Com esse serviço, é possível realizar prevenção de colisão, análise de reentrada e de *breakup* [21]. Por último, a SCSE recebe análises de conjunções do *Space Data Center* (SDC) somente para o Satélite Geoestacionário de Defesa e Comunicações Estratégicas (SGDC), visto que é um contrato firmado pela Telebrás, que opera o SGDC em conjunto com a FAB.

D. Soberania no Poder Espacial

Sob a perspectiva militar, o conceito de *Space Domain Awareness* (SDA) - traduzido como Consciência do Domínio Espacial - é a evolução militar das atividades de SSA, em que o cerne é gerar informações de inteligência que assessorem os tomadores de decisão na defesa e na segurança das operações espaciais militares [22]. Isso também inclui conhecer as capacidades do adversário a fim de neutralizá-lo e obter vantagem sobre ele. Por isso, é tão importante haver uma doutrina espacial de operação, que considere essas peculiaridades do espaço exterior. Seu controle é vital para a dissuasão por ser essencial na vitória de uma guerra [23], visto que, no mundo atual, a informação é o bem mais valioso, inclusive no ambiente espacial.

A guerra de SSA (chamada de *SSA Warfare*) envolve três princípios fundamentais [24]:

- 1) Manter a precisão das próprias informações de SSA;
- 2) Degradar a precisão das informações de SSA do oponente; e
- 3) Evitar riscos colaterais que possam pôr em perigo as operações de O/O não combatentes.

Há diversas técnicas para impossibilitar a custódia constante de satélites inimigos, por exemplo, modificar as características do sinal que um satélite transmite [24]. Isso poderia confundir o adversário até perceber o que ocorreu. Outra forma seria manter o satélite recém-lançado junto com seu corpo de foguete, de tal forma que não saiba distinguir os dois objetos. Também é possível realizar uma RPO com outro satélite aliado ou com um satélite inimigo e coordenar para que mantenha-se próximo e desorientado o adversário.

Destarte, é de extrema importância que o Brasil seja soberano nas informações de SSA, principalmente no âmbito de SDA. Evidentemente, a soberania do poder espacial não é tão simples de se atingir, portanto, por enquanto, deve-se utilizar bem todos os recursos disponíveis, inclusive estrangeiros, para refinar os dados e manter os satélites militares brasileiros seguros e operacionais.

IV. METODOLOGIA

Este estudo propõe um fluxo de processo integrado para a COLA entre objetos espaciais, adaptado à realidade operacional do COPE. A metodologia foi desenvolvida a partir de três pilares principais: (1) revisão teórica das práticas adotadas, conforme Seção III, como da USSF e da ESA; (2) análise crítica dos recursos disponíveis no COPE, incluindo as parcerias internacionais citadas na Subseção III-C; e (3) a experiência operacional do autor na SCSE do COPE.

O processo de COLA foi estruturado em três etapas principais, conforme o modelo da Subseção III-A: Triagem de Avaliação de Conjunção (CA), Análise de Conjunção e Avaliação de Riscos (CARA) e Planejamento de Mitigação de Colisões. Na fase inicial, os dados são coletados a partir de fontes, como o catálogo Space-Track, com critérios de triagem diferenciados para LEO e GEO. Para LEO, são considerados eventos com $P_c \geq 10^{-5}$ e $TCA \leq 3$ dias, enquanto para GEO, os limites são $d_{\min} \leq 10$ km e $TCA \leq 7$ dias. Para a CARA, inclui-se a verificação de satélites ativos com sistemas de propulsão e se a conjunção persistir.

As ações de mitigação abrangem desde manobras evasivas convencionais (uso de propulsores) até técnicas alternativas, como o “duck maneuver” (redução da área de seção transversal). Para casos de RPOs suspeitas, foi proposto um protocolo de acionamento de inteligência, envolvendo o Supervisor de Operações Espaciais (SOE) e a cadeia de comando do COPE.

Entre as limitações, reconhece-se a dependência de parcerias como o Space-Track (que pode impor restrições de acesso) e as incertezas inerentes à propagação orbital, especialmente em LEO, devido ao arrasto atmosférico. Para consolidar o método, recomenda-se a realização de testes operacionais com satélites da FAB e a contínua atualização dos critérios com base em novas ameaças e tecnologias.

Em síntese, esta metodologia não apenas replica práticas consolidadas, mas também introduz adaptações inovadoras, como a análise proativa de RPOs e a integração de múltiplas fontes de dados, contribuindo para um processo de COLA mais robusto e adaptado às necessidades do COPE.

A. Simbologia dos Fluxogramas

Para representar visualmente o fluxo de decisão do processo de COLA, foram elaborados fluxogramas no software Lucidchart. A Tabela II fornece um melhor entendimento do significado de cada um dos símbolos utilizados na construção dos fluxogramas [25]. Além disso, para tornar os esquemas mais didáticos, aplicaram-se cores diferentes para cada tipo de cartão.

TABELA II. SIMBOLOGIA UTILIZADA PARA OS FLUXOGRAMAS. ADAPTADO DE [25].

Símbolo	Nome	Descrição
	Processo	Representa uma etapa, uma ação ou uma função
	Decisão	Indica uma questão a ser respondida
	Início	Representa o início do fluxograma
	Fim	Representa o fim do fluxograma
	Banco de dados	Representa dados ou informações de input para aquela etapa
	Processos predefinidos	Indica a entrada em outro fluxograma
	Operação manual	Indica um passo que deve ser executado manualmente, não pode ser automatizado
	Entrada manual	Representa a entrada de dados a partir de simulações realizadas manualmente

V. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Baseado na metodologia proposta na Seção IV, propõe-se um procedimento de como lidar com o alerta de conjunção para o COPE. Para isso, além da CSE, também deve-se saber o que é o objeto, a quem pertence e qual seu propósito, de modo a prevenir-se de possíveis ameaças.

A. Triagem Diária de Avaliação de Conjunção

Baseado nas atividades estudadas, referentes à realização de uma triagem inicial, desenvolveu-se um fluxograma a fim de detalhar a sequência de eventos apresentada na Fig. 3. Para a triagem diária, é proposto que se estude a possibilidade de haver conjunção entre os ativos do COPE com todos os objetos do catálogo do Space-Track. Com a parceria do SSA *Sharing Agreement*, é possível utilizar o catálogo SP, o que permite refinar a órbita propagada para mais próximo da realidade.

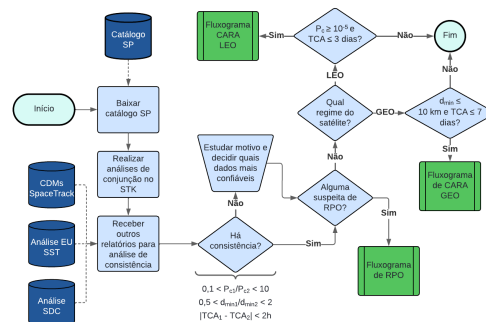


Fig. 3. Fluxograma de atividades para triagem inicial de CA.

B. Processo de Avaliação de Risco

Para prosseguir na presente etapa, além dos dados já obtidos na fase anterior, existem outros recursos que podem ser utilizados, como o JCO e os próprios sensores para a determinação de órbita. Neste último, dados serão coletados pelo sensor e serão utilizados nos softwares de uso do COPE. Para satélites em órbita LEO e GEO, foram elaborados fluxogramas de ação para conter o risco (vide Figs. 5 e 6) para órbita LEO e GEO, respectivamente). Se necessário, deve-se avançar para o processo de planejamento de manobras anticolisão ou de suspeita de RPO.

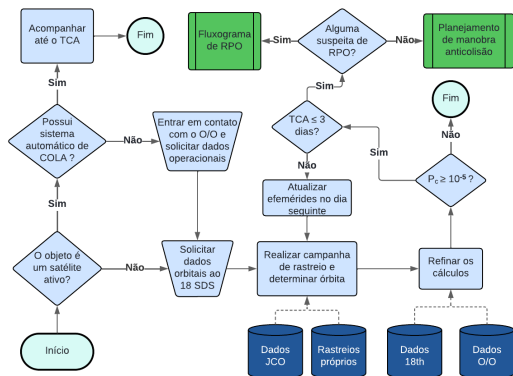


Fig. 4. Fluxograma de atividades para CARA em órbita LEO.

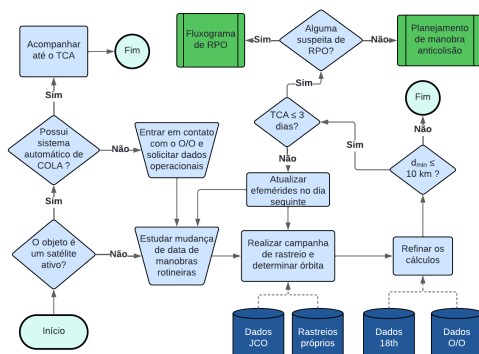


Fig. 5. Fluxograma de atividades para CARA em órbita GEO.

C. Combate aos riscos

Caso as etapas anteriores não tenham resultado na finalização do processo e ele tenha progredido a este estágio, isso significa que há uma ameaça concreta a ser enfrentada. Segundo propõe a Tabela I do manual da USSF [16], recomenda-se agir para atenuar os impactos e os riscos a partir do TCA menor do que 3 dias.

1) *Possibilidade de Colisão*: Assim que o TCA se torna inferior a 3 dias e a P_c permanece acima de 10^{-5} (ou d_{min} abaixo de 10 km para GEO), torna-se essencial realizar algumas simulações de manobras, investigando diferentes formas e momentos de execução, para encontrar uma solução que seja tanto segura quanto econômica, conforme ilustrado na Fig. 6.

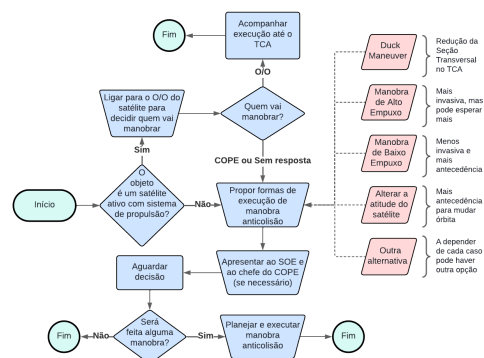


Fig. 6. Fluxograma de planejamento de manobra anticolisão.

2) *Aproximação Deliberada*: Além da avaliação de conjunção, um outro aspecto que é proposto neste trabalho é a hipótese de haver uma RPO não cooperativa, definido na Seção II-B. Com a finalidade de identificar esse cenário, para um objeto realizar RPO, este deve ser um satélite ativo com propulsores e precisará ingressar em um plano orbital similar ou próximo daquele do satélite-alvo. De qualquer forma, esse tipo de atividade deve ser lidada pelas autoridades e, para isso, não há um procedimento claro. O que é proposto no fluxograma da Fig. 7 é o modo que a SCSE deve agir no assessoramento do SOE e do chefe do COPE.

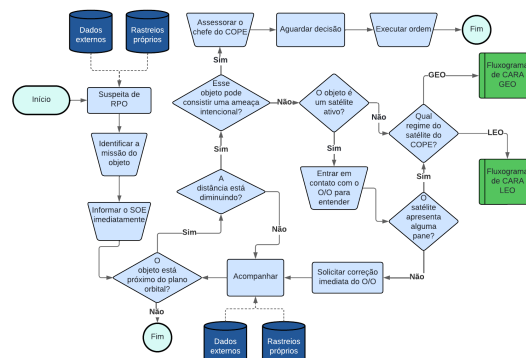


Fig. 7. Fluxograma de atividades para combater suspeita de RPO.

D. Contribuições e Adaptações do Método

Através dos estudos realizados, percebeu-se que os critérios de avaliação de risco são de decisão do operador (conforme Seção III). É importante destacar que algumas técnicas existentes foram replicadas, principalmente do manual da USSF [16], no entanto, deseja-se distinguir o que foi sugerido pelo autor. Primeiramente, o fluxograma da triagem inicial (Fig. 3) é um processo já vigente na SCSE, sendo acrescido a análise da possibilidade de RPO e a verificação de consistência, além de propor diferentes valores para P_c , d_{min} e tempo até o TCA. Para o fluxograma de análise de risco em órbita LEO (Fig. 4) foram acrescentadas as perguntas referentes ao objeto secundário ser um satélite ativo e possuir um sistema automático de COLA. O motivo foi porque, se for um satélite ativo, é possível adquirir informações de posição mais precisas com o O/O ou, ainda, se o satélite possuir um sistema automático para prevenir colisões, pode não haver necessidade de qualquer ação do COPE. Por fim, as ações de mitigação da Fig. 6, para

manobra anticolisão, e da Fig. 7, para suspeita de RPO, foram integralmente propostas pelo autor deste trabalho.

VI. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma metodologia estruturada para COLA no contexto do COPE, integrando práticas internacionais consolidadas com as necessidades específicas da operação brasileira. O método proposto, organizado em três etapas principais (triagem, análise de risco e mitigação), demonstrou ser eficaz na padronização de processos críticos, desde a identificação de conjunções até a tomada de decisão em cenários complexos, como aproximações deliberadas.

Apesar dos avanços, o método enfrenta dependência de parcerias internacionais para acesso a dados de alta precisão (ex.: catálogo SP da USSF), o que pode limitar sua autonomia em cenários geopolíticos adversos. Para superar essa limitação e ampliar as capacidades do COPE, recomenda-se o desenvolvimento de sensores e sistemas próprios para rastreamento orbital, diminuindo a dependência de dados estrangeiros.

Este trabalho representa um passo significativo na consolidação de um processo de COLA robusto para o COPE, equilibrando rigor técnico e praticidade operacional. As limitações identificadas não invalidam a metodologia, mas destacam oportunidades de evolução. Para isso, espera-se a implementação prática aos satélites da FAB.

REFERÊNCIAS

- [1] NASA, "Orbital debris," Quarterly News, vol. 28, no. 3, p. 10, jul 2024. Disponível em: <<https://orbitaldebris.jsc.nasa.gov/quarterly-news/pdfs/ODONv28i3.pdf>>. Acesso em: 28/07/2024.
- [2] B. Weeden, "2007 chinese anti-satellite test fact sheet," Washington, DC, 2010. Disponível em: <<https://swfound.org/media/9550/chineseasatfactsheetupdated2012.pdf>>. Acesso em: 22/06/2024.
- [3] —, "2009 iridium-cosmos collision fact sheet," Washington, DC, 2010. Disponível em <https://www.swfound.org/media/6575/swf_iridium_cosmos_collision_fact_sheet_updated_2012.pdf>. Acesso em: 22/06/2024.
- [4] T. Pultarova and E. Howell, "Starlink satellites," New York, NY, 2024. Disponível em: <<https://www.space.com/spacex-starlink-satellites.html>>. Acesso em: 22/06/2024.
- [5] Instituto Histórico-Cultural da Aeronáutica, "Emblema COMAE," Rio de Janeiro, RJ, 2015. Disponível em: <[https://www2.fab.mil.br/incaer/index.php/heraldica-siscult/emblemas2/630-comae#:~:text=Destarte%2C%20esse%20conjunto%20simboliza%20a,soberania%20do%20espaço%20aéreo%20brasileiro](https://www2.fab.mil.br/incaer/index.php/heraldica-siscult/emblemas2/630-comae#:~:text=Destarte%2C%20esse%20conjunto%20simboliza%20a,soberania%20do%20espaço%20aéreo%20brasileiro.)>. Acesso em: 28/06/2024.
- [6] R. J. Rovetto and T. S. Kelso, "Ssi issue guide to ssa," Adelaide, Australia, 2020. Disponível em: <https://spacesecurityindex.org/wp-content/uploads/2020/11/IssueGuide_SSAfix.pdf>. Acesso em: 01/07/2024.
- [7] J. A. Kennewell and B.-N. Vo, "An overview of space situational awareness," Proceedings of the 16th International Conference on Information Fusion, pp. 1029–1036, 2013. Disponível em: <<https://www.spaceacademy.net.au/intell/ssa.htm>>. Acesso em: 01/07/2024.
- [8] R. Reesman and A. Rogers, "Getting in your space: Learning from past rendezvous and proximity operations," El Segundo, CA, Maio 2018. Disponível em: <<https://csps.aerospace.org/sites/default/files/2021-08/GettingInYourSpace.pdf>>. Acesso em: 27/07/2024.
- [9] T. G. Roberts, "Luch (olymp)/athena-fidus," Washington, DC. Disponível em: <https://satelitedashboard.org/analysis/luch-olymp-athena-fidus/>. Acesso em: 27/07/2024.
- [10] B. Weeden and V. Samson, "Global counterspace capabilities," Washington, DC, Abril 2024. Disponível em: <https://www.swfound.org/media/207826/swf_global_counterspace_capabilities_2024.pdf>. Acesso em: 27/07/2024.
- [11] J. L. Foster and H. S. Estes, A Parametric Analysis of Orbital Debris Collision Probability and Maneuver Rate for Space Vehicles. Houston, TX: NASA, National Aeronautics and Space Administration, Lyndon B. Johnson Space Center, 1992. Disponível em: <https://stacks.stanford.edu/file/druid:dg552pb6632/Foster-estes-parametric_analysis_of_orbital_debris_collision_probability.pdf>. Acesso em: 13/07/2024.
- [12] "Cooperative initiative on space traffic management (stm) memorandum of understanding," Bremen, Germany, 2018. Disponível em: <<https://iaaspace.org/wp-content/uploads/iaa/Communication/stm-mou.pdf>>. Acesso em: 01/07/2024.
- [13] H. D. Curtis, Orbital mechanics for engineering students, 4th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2020, cap. 6.
- [14] S. R. Omar and R. Bevilacqua, "Spacecraft collision avoidance using aerodynamic drag," Journal of Guidance, Control, and Dynamics, vol. 43, no. 3, pp. 567–573, Março 2020. Disponível em: <<https://arc.aiaa.org/doi/pdf/10.2514/1.G004518>>. Acesso em: 01/08/2024.
- [15] "Spacex's approach to space sustainability and safety," McGregor, TX, 2022. Disponível em: <<https://www.spacex.com/updates/#sustainability>>. Acesso em: 15/07/2024.
- [16] United States, 18th & 19th Space Defense Squadron. Spaceflight Safety Handbook for Satellite Operators, Vandenberg, CA, Abril 2023. Disponível em <https://www.space-track.org/documents/SFS_Handbook_For_Operators_V1.7.pdf>. Acesso em: 11/07/2024.
- [17] D. L. Boulet, Methods of Orbit Determination for the Micro Computer. Richmond, Va: Willmann-Bell Inc., 1991, cap. 6.
- [18] United States, "Strategic Command. USSTRATCOM, Brazil sign agreement to share space services, data," Omaha, NE, 2018. Disponível em: <<https://www.stratcom.mil/Media/News/News-Article-View/Article/1607213/usstratcom-brazil-sign-agreement-to-share-space-services-data/>>. Acesso em: 28/06/2024.
- [19] COMAE, "Militares do COMAE realizam curso na força espacial americana," Brasília, DF. Disponível em: <<https://www.fab.mil.br/noticias/mostra/40616/SEGURANA%20ESPACIAL%20-%20Militares%20do%20COMAE%20realizam%20curso%20na%20Fora%20Espacial%20Americana>>. Acesso em: 17/07/2024.
- [20] B. Bonnette, "Joint task force-space defense commercial operations cell receives new name," Colorado Springs, CO, 2023. Disponível em: <<https://www.spacecom.mil/Newsroom/News/Article-Display/Article/3629834/joint-task-force-space-defense-commercial-operations-cell-receives-new-name>>. Acesso em: 16/07/2024.
- [21] EUSPA, "Eusst fact sheet," Julho 2023. Disponível em: <https://www.eusst.eu/wp-content/uploads/2023/11/EUSST_Factsheet_2023.pdf>. Acesso em: 17/07/2024.
- [22] L. F. M. Nohra, Emprego Militar do Espaço. São Paulo, SP: Editora Dialética, 2023, pag. 105.
- [23] J. V. Vital and M. H. F. Souza Rolim, "Expressão militar do setor estratégico espacial: evolução e o direito. caso brasileiro: quarta geração da força aérea brasileira," De Legibus-Revista de Direito da Universidade Lusófona.
- [24] S. Eves, "Space situational awareness warfare," Freeman Air and Space Institute, Julho 2019. Disponível em: <<https://www.kcl.ac.uk/warstudies/assets/ssa-warfare.pdf>>. Acesso em: 19/07/2024.
- [25] "Simbologia de um fluxograma," 2024. Disponível em: <<https://www.lucidchart.com/pages/pt/fluxograma-simbologia>>. Acesso em: 25/07/2024.