

MITIGAÇÃO DE DETRITOS ESPACIAIS EM ÓRBITA BAIXA ATRAVÉS DO SOFTWARE DRAMA

Ana Júlia Albergaria Motta Dias¹, Jean Paulo dos Santos Carvalho²

¹IFBA – Campus Feira de Santana (anajuuliiiaa123@gmail.com)

²Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Feira de Santana, Brasil

Resumo: Esse trabalho explica a problemática dos detritos espaciais, principalmente em órbita terrestre baixa. A partir de revisão bibliográfica, discute-se o aumento contínuo de detritos resultantes de colisões e fragmentações entre objetos espaciais. Apresentamos os conceitos relacionados à mitigação de detritos, destacando o uso do software DRAMA para prever a evolução de órbitas e avaliar o uso de dispositivos aerodinâmicos passivos pós fim de vida nominal do objeto espacial.

Palavras-chave: Detritos espaciais; Mitigação de detritos espaciais; Diretrizes de mitigação; Software DRAMA; Órbita terrestre baixa.

INTRODUÇÃO

Os detritos espaciais, também denominados como lixo espacial, são todos os objetos não funcionais e de origem humana que estão em órbita da Terra ou que estão reentrando na atmosfera. Segundo a ESA (2025), conforme apresentado no Relatório do Ambiente Espacial da ESA, atualmente mais de cerca de 40.000 objetos estão em órbita sendo rastreados, dos quais cerca de apenas 11.000 estão ativos. No entanto, estima-se a existência de aproximadamente um milhão de fragmento maiores que 1 cm, e apesar do tamanho, são suficientes para causar danos catastróficos a uma espaçonave.

Esses objetos de tamanho reduzido são, em sua maioria, resultado de fragmentações de menor escala, ocasionadas geralmente por eventos de explosão ou colisão com outros detritos. O lixo espacial é um problema que tem impactos na exploração do espaço, esses objetos podem causar danos em satélites ativos na órbita terrestre, e quando retornam para o planeta, podem causar prejuízos por consequência da queda de fragmentos, que sobrevivam a reentrada da atmosfera, em regiões habitacionais ou industriais. (CARVALHO; LIMA; GONÇALVES, 2021, p. 65).

Esse fato demonstra a importância das medidas tomadas ao final da vida útil de um satélite ou lançador para reduzir o risco de tais ocorrências. Nesse contexto, existem diferentes tipos de estratégias de mitigação que podem ser implantadas ao final da vida útil do objeto, incluindo a desorbitação (remoção segura do detrito espacial de órbitas importantes) e técnicas de passivação utilizadas para prevenir explosões. Essas estratégias consideram diretrizes

espaciais, unificadas ou não, estabelecidas em diversos contextos.

Estes chamados de detritos espaciais podem ser frações de satélites e espaçonaves ou até mesmo objetos perdidos por astronautas; todo e qualquer artefato não funcional permanecendo em órbita, como satélites desativados, estágios de foguetes e inúmeros fragmentos gerados por explosões, colisões, testes militares ASAT e separações de propelente.

Conforme discutido por Carvalho, Lima e Gonçalves (2021), os detritos espaciais dificultam a realização de missões na órbita terrestre e são grandes causadores de acidentes no meio sideral. Segundo Don Kessler (1978), especialista em detritos espaciais da NASA, quanto mais houver exploração espacial, maior será a quantidade de detritos, pois colisões geram mais colisões. Esse fenômeno é conhecido como Síndrome de Kessler.

Os riscos associados são diversos. Colisões podem destruir satélites ativos e interromper serviços essenciais, como navegação (GPS), telecomunicações e monitoramento climático, além de colocar em risco missões tripuladas. Há também o risco de reentrada descontrolada de fragmentos na atmosfera, embora seja menos frequente (ESA, 2024).

Com o aumento das explorações espaciais, o risco de queda de detritos que sobrevivem à reentrada na atmosfera e podem atingir áreas habitadas tem se tornado mais significativo (CASSITA, 2025). Em 2025, um fragmento metálico não identificado caiu do espaço em área desértica do oeste Australiano, como é possível notar na Figura 1, registrada pela Western Australia Police (2025).

Ainda em 2025, três astronautas chineses tiveram de adiar o retorno à Terra por tempo indeterminado após sua espaçonave ser atingida por um detrito espacial, houve “um suposto impacto de micro detritos espaciais”. O caso demonstra o quanto o lixo espacial pode ser perigoso quando se trata de colisões e podem interferir nas missões espaciais.



Figura 1. Fragmento de detrito espacial encontrado na Austrália após reentrada.

Fonte: <https://canaltech.com.br/espaco/destrocos-misteriosos-que-cairam-em-chamas-na-australia-podem-ser-foguete-chines/>

De acordo com a ESA (2024), uma vez em órbita, detritos permanecem por décadas ou séculos dependendo da altitude: acima de 600 km, a atmosfera rarefeita não afeta muito o tempo de vida desses objetos. E assim, como explicado anteriormente, cada fragmentação nova aumenta o risco de colisões subsequentes, gerando ainda mais detritos.

As principais órbitas terrestres são: Órbita Geoestacionária (GEO), Órbita Geossíncrona Inclinada (IGO), Órbita Geoestacionária Estendida (EGO), Órbita dos satélites de navegação (NSO), Órbita de Transferência (GEO-MEO), Órbita Terrestre Média (GMO), Órbitas de cruzamento (MEO-GEO), Órbita baixa da Terra (LEO), Órbita Terrestre de Alta Altitude (HAO), Órbitas de cruzamento(MGO-HEO), Órbita Terrestre Excêntrica (LMO), Órbitas de cruzamento (LEO-MEO), Órbita indefinida (UFO), Órbitas de Fuga (ESO). (CARVALHO; LIMA; GONÇALVES, 2021, p. 70).

De acordo com Carvalho, Lima e Gonçalves (2021), existem cerca de 14 órbitas principais. É possível notar um número expressivo de detritos espaciais na Órbita Baixa da Terra (LEO), o que é preocupante, pois de acordo com a ESA (2020): a proximidade da órbita LEO com a Terra a torna útil por diversos motivos. É a órbita mais comumente usada para imagens de satélites, pois a proximidade com a superfície permite capturar imagens com maior resolução. É também a órbita da Estação Espacial Internacional (ISS), já que

facilita o deslocamento dos astronautas até ela e a partir dela, devido à menor distância percorrida.

A maior concentração de detritos está na LEO. Tal órbita abriga tanto satélites ativos, pois é a principal órbita utilizada para satélites de comunicação, quanto detritos espaciais. Dessa forma, os detritos espaciais representam riscos tanto orbital (colisões) quanto de reentrada. Em órbitas congestionadas como a LEO, a probabilidade de colisão entre objetos é real e crescente.

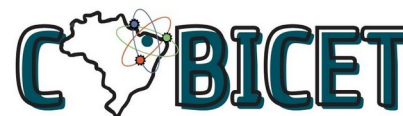
Nesse contexto, tais situações levantam questões no âmbito do Direito Espacial; na Assembleia Geral do Comitê das Nações Unidas em 2007, foram aprovadas um conjunto de Diretrizes para a Mitigação de Detritos Espaciais e um compêndio de normas para mitigação de detritos espaciais foi compilado pelo Escritório das Nações Unidas para a Utilização Pacífica do Espaço Exterior (UNOOSA), com objetivo de auxiliar nas discussões sobre as medidas de mitigação com enfoque jurídico e científico (UNOOSA, 2026).

Nesse âmbito do Direito Espacial, a maioria das nações que possuem um alto nível de atividades espaciais adotaram as medidas das diretrizes de mitigação depois que elas foram oficialmente aprovadas, e a partir de 2008, as missões passaram a ter esse caráter mais eficiente para minimização de detritos, dessa forma, as medidas são promissoras, mas devido aos dados recentes de objetos inoperantes que continuam a poluir as órbitas da Terra, o problema ainda exige cuidado (PAULA; CELESTINO, 2019 apud CARVALHO; LIMA; GONÇALVES, 2021).

Em 2023, a Agência Espacial Europeia (ESA) lançou a política Zero Debris e atualizou requisitos internos. A nova política exige, por exemplo, reduzir o prazo de remoção em LEO de 25 anos para 5 anos.

Atualmente, há diversas formas de mitigação para remediar a multiplicação de detritos espaciais, limitando seu crescimento desenfreado. Nesse contexto, existem alguns documentos internacionais que regularizam o campo de mitigação desses objetos e são conhecidos globalmente, como as Diretrizes de mitigação de detritos espaciais do Comitê para os Usos Pacíficos do Espaço Sideral e as Diretrizes de mitigação de detritos espaciais da IADC. De acordo com USOVIK (2023), o cumprimento dos requisitos desses documentos regulatórios e técnicos é a base para a mitigação e remediação de detritos espaciais.

O método de mitigação de detritos espaciais abrange as fases de lançamento, operação e remoção/passivação dos sistemas espaciais. O GOST R é o principal documento sobre mitigação de detritos espaciais na Federação Russa, estabelecendo diversos requisitos em conformidade com diretrizes de mitigação amplamente aceitas internacionalmente, é



um bom exemplo de documento nacional que exemplifica práticas unificadas mundialmente.

Na fase de lançamento, estão dispostas técnicas avançadas, a principal delas é a avaliação do risco de colisão com objetos espaciais catalogados e, se possível, escolha dos intervalos de tempo de lançamento para minimizar o risco de colisões com esses objetos, ao utilizar dados de sistemas de vigilância espacial para lidar com isso, é possível considerar um provável risco de colisão e, dessa forma, tomar alguma decisão, como lançar o satélite em outro horário.

De acordo com o modelo GOST R, as órbitas mais congestionadas estão entre 800-900 km, especialmente aquelas que estão em sincronia com o Sol. Nessa faixa, estima-se que um satélite com área de seção transversal de 25 m² possa sofrer, em média, uma colisão com objetos maiores que 1 cm a cada 8 anos. Considerando isso, a opção mais prudente é escolher órbitas com menor fluxo de detritos ao desenvolver novos sistemas espaciais, a fim de diminuir o risco de colisão.

Durante a fase de funcionamento, as principais soluções incluem manobras para evitar uma colisão, o uso de satélites de manutenção orbital para alterar a órbita de objetos em caso de aproximação perigosa, além do monitoramento contínuo dos satélites ativos.

Por fim, no que se refere à remoção de detritos em órbita baixa, utiliza-se amplamente dispositivos aerodinâmicos passivos, cujo funcionamento se baseia no aumento da área de seção transversal do satélite, resultando em maior força de arrasto atmosférico (USOVIK, 2023).

Com o crescente aumento do número de satélites em órbita, a ESA, vem aprimorando suas ferramentas de mitigação e modelagem de detritos espaciais que são oferecidas a indústria. Dessa forma, o software DRAMA (Debris Risk Assessment and Mitigation Analysis), é uma ferramenta que pode ser utilizada no auxílio da avaliação de conformidade em relação aos requisitos de mitigação de detritos espaciais (KRAG et al., 2025).

A agência espacial europeia disponibiliza o portal do usuário do software Drama (Debris Risk Assessment and Mitigation Analysis); trata-se de um software abrangente da ESA. Em especial, o módulo OSCAR é uma ferramenta que foi desenvolvida a fim de simular manobras de descarte e prever a órbita de um objeto, verificando assim, a conformidade da missão de retirada em relação aos requisitos de mitigação, portanto, o OSCAR pode ser usado para analisar diferentes estratégias de descarte após o fim da vida útil nominal de uma espaçonave, além de permitir a

análise da evolução orbital considerando diferentes cenários futuros de atividade solar e geomagnética, pois são fatores determinantes na estimativa de vida útil da órbita.

Segundo Braun *et al.* (2016), o módulo OSCAR-DRAMA considera uma propagação semi-analítica que inclui perturbações naturais relevantes a uma órbita terrestre baixa (LEO), evidenciando que, nesse modelo, não é possível analisar como age uma perturbação específica isoladamente, apenas uma análise conjunta do que é tido como relevante.

Por fim, o objetivo desse trabalho é discorrer sobre a problemática dos detritos espaciais associando ao software DRAMA, da ESA, em especial ao módulo OSCAR, avaliando o quanto ele se mostra adequado para análises de evolução orbital em órbitas baixas da Terra, a partir do modelo semi-analítico que considera efeitos importantes, como o arrasto atmosférico. Quanto a isso, faz-se uma simulação indireta de vida de arrasto a fim de verificar se os padrões internamente configurados são fisicamente coerentes.

MATERIAL E MÉTODOS

De acordo com as diretrizes internacionais de mitigação de detritos espaciais, o projeto de uma espaçonave deve fornecer um plano de mitigação para o final da missão. Para objetos em órbita baixa da Terra, o plano era a avaliação de vida útil restante após o término das operações funcionais com base na regra dos 25 anos, indicando que, objetos espaciais devem se desintegrar em até 25 anos após o término da missão.

Muitos detritos em órbita LEO não precisavam de manobras de descarte, pois cumpriam a antiga regra atribuída por decaimento natural. Em algumas diretrizes recentes da ESA, foi proposta uma redução do prazo de reentrada de detritos em órbita baixa para até 5 anos, assumida como um valor de referência para minimizar o acúmulo de detritos.

Nesse contexto, o módulo OSCAR do DRAMA permite calcular e simular a vida útil orbital remanescente a partir do momento em que o satélite se torna inativo, possibilitando a comparação do resultado com as atuais diretrizes de mitigação.

No entanto, existe uma fonte de incertezas que perpetua na avaliação de estimativa de vida útil restante de determinada órbita. Essas estão relacionadas principalmente a grandezas difíceis de estimar, como as próprias perturbações naturais. As oscilações temporais também tornam a data da manobra incerta por conta de fatores como atraso e extensões da missão.

Sendo assim, os estudos realizados por Braun *et al.* (2016), revelam as possíveis consequências do uso de testes errôneos desenvolvidos no software para análise de conformidade de uma missão nos modelos da termosfera, modelagem da altitude do satélite e seu coeficiente de arrasto.

De maneira análoga, torna-se relevante analisar inicialmente o modelo semi-analítico configurado no software, para então concluir a veracidade de um teste ou simulação. Como é possível perceber na Figura 2, a ferramenta OSCAR do DRAMA possui 4 opções configuráveis.

Basic Settings
Disposal Options
Orbit Prediction
Plot Options

Figura 2. Interface da ferramenta OSCAR do software DRAMA. Fonte: software DRAMA

Nas configurações básicas, determina-se a data de início da simulação, (momento em que a primeira manobra de descarte ao final da vida útil começa), os elementos orbitais clássicos e os parâmetros da espaçonave necessários: área da seção transversal (em m²), a massa da espaçonave (em kg), bem como o arrasto e o coeficiente de relatividade. Na Figura 3, verifica-se tais parâmetros.

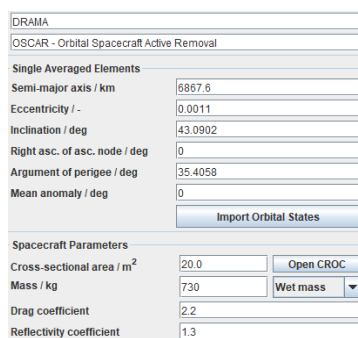


Figura 3. Inserção das configurações básicas na ferramenta OSCAR. Fonte: software DRAMA

A partir disso, é possível adicionar opções de descarte a simulação, como mostra a Figura 4. Elas são: desorbitação direta, desorbitação retardada e reorbitação. Ao escolher não selecionar opções de descarte, a espaçonave permanecerá na órbita definida pelas configurações básicas e o software calcula apenas sua evolução.

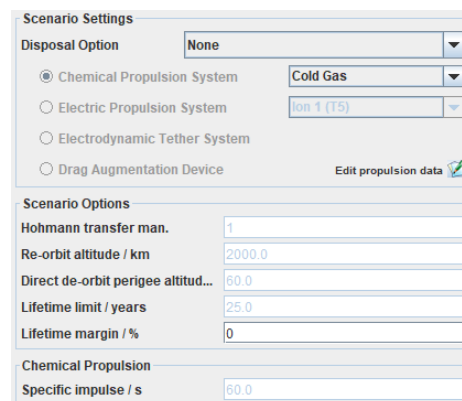


Figura 4. Interface parcial das opções de descarte na ferramenta do OSCAR. Fonte: software DRAMA

Além disso, o usuário decide também qual sistema de propulsão será utilizado. A previsão de órbita é uma das principais ferramentas, pois prevê como a atividade solar e geomagnética se comportará no futuro, o que afeta significativamente a órbita dos satélites. O OSCAR oferece diferentes métodos de previsão e cenários, esses determinam atividade solar e arrasto atmosférico, como dito anteriormente.

Dentre os cenários principais, estão os cenários de melhor e pior caso e o cenário mais recente. A previsão recente, utiliza arquivos de entrada da ESA para simular uma atividade solar e um arrasto atmosférico de forma realista, já os cenários de melhor e pior caso consideram órbitas que duram mais e órbitas que duram menos, respectivamente. É possível carregar o próprio arquivo com dados personalizados de atividade solar e geomagnética.

Por fim, nas opções de plotagem é possível gerar até seis gráficos diferentes com base nos resultados da simulação do OSCAR. Segundo Barato (2022), existem diversas formas propostas para desorbitar um satélite, entre elas estão a decadência aerodinâmica natural (às vezes, com um dispositivo para aumentar o arrasto, ou seja, uma vela de arrasto), a desorbitação propulsiva, os cabos eletrodinâmicos e as velas solares. No software DRAMA, tais estratégias de mitigação podem ser exploradas de diferentes formas.

A vela de arrasto aumenta o tamanho da área da seção transversal efetiva do detrito espacial, e a ideia é que toda sua área esteja alinhada com o fluxo incidente, porém, a atitude do satélite não é previsível, ou seja, ele pode mudar de posição, fazendo com que nem toda a área esteja diretamente exposta ao fluxo, o que reduz drasticamente o arrasto que a atinge e, portanto, atrasa a desorbitação.

Nesse contexto, há uma degradação de desempenho pouco previsível, mas, se tratando de uma órbita

abaixo de 600 km de altitude, essa estratégia ainda é válida, pois o arrasto é grande, acima disso a eficácia pode vir a ser menor.

Nesse artigo, foi adotada uma estratégia indireta para simular o efeito de um dispositivo de aumento de arrasto sobre o tempo de decaimento orbital de um objeto, a fim de verificar a conformidade dos modelos de arrasto atmosférico internamente configurados no software.

Realizou-se a modificação da área de seção transversal nos parâmetros da espaçonave na simulação, nas configurações básicas. Ou seja, uma vela de arrasto foi simulada de maneira indireta, pois não foi diretamente selecionada nas opções de descarte. Essa abordagem permite avaliar o impacto do aumento da área exposta ao fluxo atmosférico sobre o comportamento orbital.

Para o trabalho de análise, inicialmente foram selecionados dois satélites ativos catalogados, que estão atualmente em órbita baixa, para inserir os parâmetros orbitais aproximadamente semelhantes aos deles nas configurações básicas do módulo OSCAR (ou seja, considerando detritos espaciais com esses parâmetros) e analisar sua evolução orbital sobre ação das perturbações naturais.

Posteriormente, a vela de arrasto foi indiretamente adicionada a um dos satélites na simulação, verificando assim a diferença entre os gráficos obtidos. Dessa forma, é possível entender quando a vela de arrasto é necessária e a eficácia de sua aplicação, consequentemente validando ou não os conceitos físicos plotados na ferramenta.

Para isso, os parâmetros de anomalia média e ascensão reta do nodo ascendente (RAAN) foram desconsiderados, tendo em vista que a posição inicial do satélite ao longo da órbita não influencia de forma significativa as grandezas analisadas neste estudo: a variação da altitude e o tempo de decaimento orbital, dentro das limitações do modelo utilizado pelo OSCAR.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

No módulo OSCAR, pertencente ao ambiente DRAMA, foram inseridos aproximadamente os parâmetros orbitais do satélite Yaogan-3304 com a finalidade de avaliar a evolução orbital de um detrito espacial com um comportamento orbital semelhante a ele sob a ação de perturbações naturais.

Com base nesses parâmetros, foram realizadas simulações para períodos 5, 10 e 25 anos. Os resultados obtidos indicam que não ocorre reentrada atmosférica ao longo do período analisado, evidenciando que as perturbações consideradas, como

as atividades solares e geomagnéticas, não são suficientes para provocar o decaimento orbital completo de um objeto com essas características. Nesse contexto, caso o satélite fosse um detrito espacial na realidade, seria necessária a aplicação de estratégias de mitigação.

Com 5 anos de simulação, as mudanças foram quase imperceptíveis, considerando uma análise de decaimento do satélite. Já durante 10 e 25 anos, as transformações foram mais visíveis, apesar de ainda pequenas. A altitude decai minimamente, como é possível perceber na Figura 5.

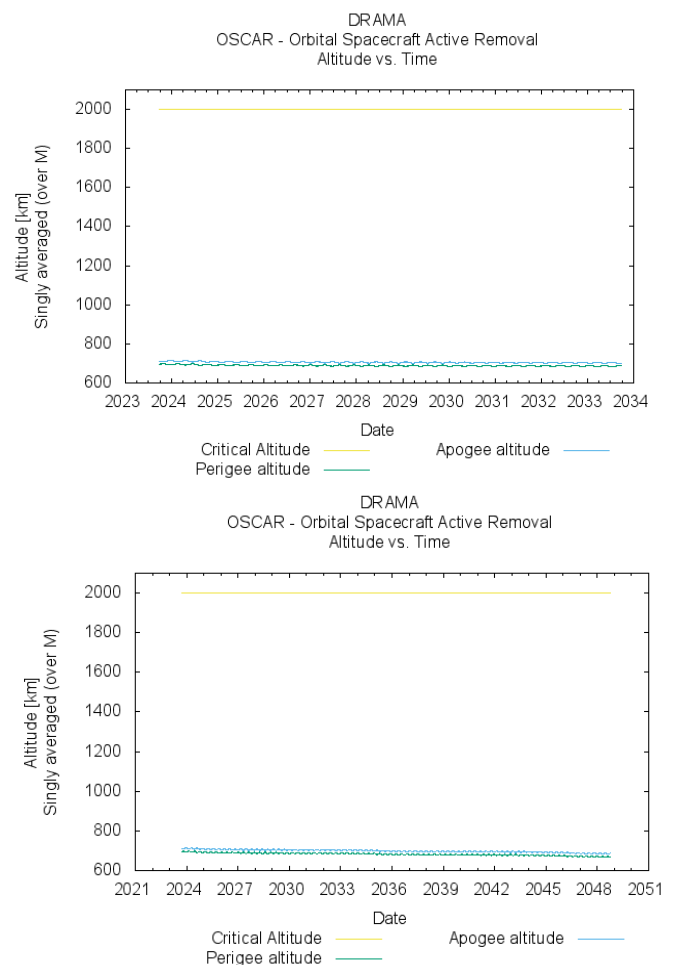


Figura 5. Gráficos da altitude do detrito espacial pelo tempo durante 10 anos e 25 anos, respectivamente. Fonte: autoria própria.

Dessa forma, observa-se um decaimento orbital lento, onde certamente seria necessária a aplicação de estratégias de mitigação. De maneira análoga, a excentricidade (e) se mostra constante durante 10 e 25 anos, como demonstra a Figura 6.

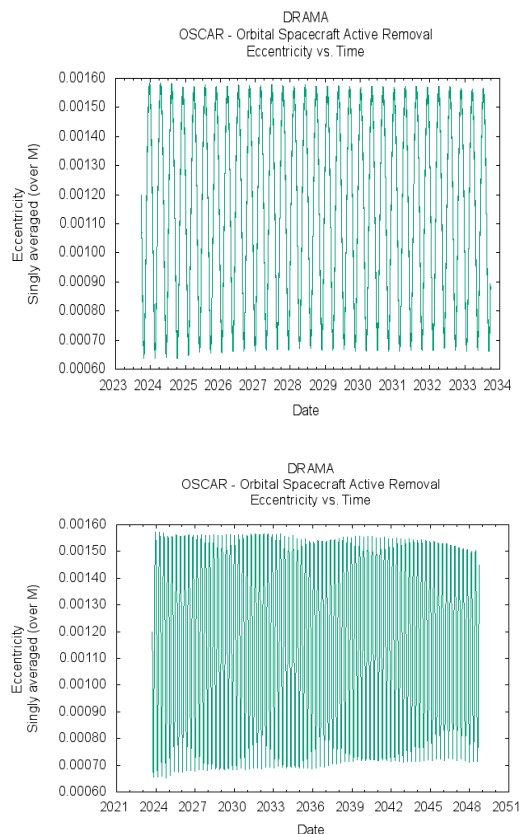


Figura 6. Gráfico de excentricidade do detrito espacial pelo tempo durante 10 anos e 25 anos, respectivamente. Fonte: autoria própria.

Através da excentricidade do detrito é possível verificar se o objeto está sendo alterado da sua órbita nominal. Assim, a excentricidade aproximadamente constante indica que o detrito sofre pouca influência de perturbações orbitais (Figura 6), podendo permanecer em órbita por um longo período.

Em contraste, na análise de um detrito com comportamento orbital semelhante a um satélite ativo pertencente à constelação STARLINK, foi observado um comportamento diferente. Em uma simulação que durou menos de 5 anos, o objeto apresentou decaimento orbital completo, com altitude tendendo a zero, evidenciando-se esse fato na Figura 7.

Esse resultado indica que, para detritos espaciais com parâmetros semelhantes, com principalmente a altitude inicial baixa, o arrasto atmosférico pode ser suficiente para removê-los da órbita ao longo do tempo. No entanto, esse satélite na realidade não é um detrito e permanece ativo porque possui sistemas de propulsão que permitem a correção e manutenção de sua órbita, no DRAMA, foi considerado um detrito com esses parâmetros, ou seja, um objeto que já não funciona, em detrimento das perturbações pertinentes nessa altitude.

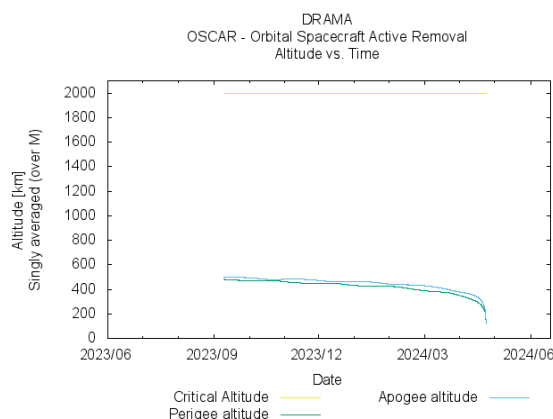


Figura 7. Gráfico de altitude do detrito espacial pelo tempo durante 226 dias, apresentando decaimento orbital. Fonte: autoria própria.

Considerando que, o tempo de decaimento orbital é aproximadamente inversamente proporcional a área da seção transversal (considerando um modelo linear simplificado), é possível analisar o quanto as simulações indiretas com vela de arrasto no DRAMA podem ser fisicamente coerentes, apesar de variáveis não tão previsíveis, como a atitude do satélite.

Tendo como base a simulação de tempo de decaimento orbital do objeto com parâmetros semelhantes a um satélite ativo pertencente à constelação STARLINK realizada anteriormente, a área da seção transversal originalmente considerada foi de 20 metros quadrados, com o acréscimo de uma vela de arrasto média de 60 metros quadrados, passou a ser de 80 metros quadrados. Esse acréscimo corresponde a um aumento de 4 vezes mais na área exposta ao fluxo atmosférico, portanto, espera-se que o tempo de permanência em órbita seja reduzido em cerca de quatro vezes.

A Figura 8 representa o comportamento da altitude do satélite com dispositivo de vela de arrasto conforme o tempo passa, dessa forma, é possível perceber que tal objeto leva apenas 53 dias para decair, ou seja, o tempo diminuiu cerca de 4,26 vezes menos em comparação com o decaimento da simulação anterior, que estava sem vela de arrasto. Sendo assim, revela-se uma diferença bruta de 0,26 e uma diferença percentual de 6,5% em relação ao valor teórico, pois, esperava-se que tal objeto decairia 4 vezes mais rápido, mas na simulação, decaiu 4,26 vezes mais rápido, a diferença ocorre por conta de fatores variáveis já citados anteriormente e pelo modelo de arrasto atmosférico considerado.

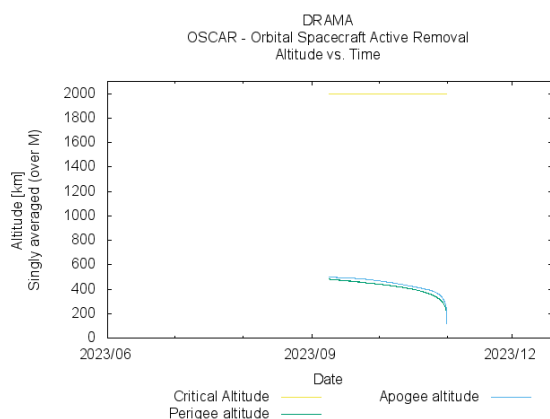


Figura 8. Gráfico de altitude do detrito espacial com vela de arrasto pelo tempo durante 53 dias. Fonte: autoria própria.

Dessa forma, o software DRAMA se mostra pertinente na análise indireta do decaimento orbital com dispositivo de vela de arrasto, considerando que o aumento da área da seção transversal do objeto diminui significativamente esse tempo, ou seja, os padrões de arrasto atmosférico plotados no software são fisicamente coerentes.

CONCLUSÃO

Analizamos o comportamento de detritos espaciais utilizando o software DRAMA da agência espacial europeia (ESA). Através do resultado, conclui-se que os padrões de arrasto atmosférico considerados no software são fisicamente coerentes, pois estão em conformidade com o conceito de que quanto maior a área da seção transversal, maior será a incidência das perturbações naturais, portanto, menor será o tempo de decaimento orbital. Dessa forma, é possível realizar simulações coerentes no software DRAMA, módulo OSCAR da ESA. Mostramos que, com uma pequena vela de arrasto, foi possível reduzir o tempo de reentrada do detrito espacial.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a Pró-Reitoria de Pesquisa, Pós-Graduação, Criação e Inovação da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB) e ao CNPq pelo apoio financeiro por meio do Programa PIBIC-Ensino Médio. Agradecemos ao orientador Prof. Dr. Jean Paulo dos Santos Carvalho pela orientação e acompanhamento contínuo durante o desenvolvimento do projeto. O autor Jean Carvalho agradece ao CNPq (processo 408221/2025-9).

REFERÊNCIAS

BARATO, Francesco. Comparison between different re-entry technologies for debris mitigation in LEO. *Applied Sciences*, v. 12, n. 19, p. 9961, 2022.

BRAUN, V. et al. *Probabilistic orbit lifetime assessment with OSCAR*. Darmstadt: European Space Agency, 2016.

CARVALHO, Jean Paulo dos Santos; LIMA, Jackson dos Santos; GONÇALVES, Carine Moreira. Poluição no ambiente espacial: O problema do lixo no espaço. *Revista Scientia*, Salvador, v. 6, n. 2, p. 61-80, ago. 2021.

CASSITA, Danielle. *Lixo espacial: 7 casos de queda de detrito do passado e as suas consequências*. Canaltech, 31 maio 2025. Disponível em: <https://canaltech.com.br/espaco/lixo-espacial-7-casos-de-queda-de-detrito-do-passado-e-as-suas-consequencias/>. Acesso em: 6 mar. 2026.

EUROPEAN SPACE AGENCY (ESA). *Low Earth orbit*. 2020. Disponível em: https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2020/03/Low_Earth_orbit. Acesso em: 6 mar. 2026.

EUROPEAN SPACE AGENCY. *The Zero Debris Charter*. 2023. Disponível em: https://www.esa.int/Space_Safety/Clean_Space/The_Zero_Debris_Charter. Acesso em: 21 fev. 2026.

EUROPEAN SPACE AGENCY. *ESA Space Environment Report 2024*. Paris: ESA, 2024.

EUROPEAN SPACE AGENCY. *ESA Space Environment Report 2025*. Paris: ESA, 2025.

KRAG, H. et al. *The Debris Mitigation Facility: A unified framework for DRAMA and MASTER*. In: International Conference on Space Debris, 2025.

UNOOSA. *United Nations Office for Outer Space Affairs. Space debris*. Disponível em: <https://www.unoosa.org/oosa/en/ourwork/topics/spac-e-debris/index.html>. Acesso em: 9 mar. 2026.

USOVIK, I. V. *Review of perspective space debris mitigation solutions*. Journal of Space Safety Engineering, v. 10, n. 1, p. 55–58, 2023.