



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
SISTEMA DE BIBLIOTECAS DA UNICAMP  
REPOSITÓRIO DA PRODUÇÃO CIENTÍFICA E INTELLECTUAL DA UNICAMP

**Versão do arquivo anexado / Version of attached file:**

Versão do Editor / Published Version

**Mais informações no site da editora / Further information on publisher's website:**

<https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/34550>

**DOI: 10.34117/bjdv7n8-379**

**Direitos autorais / Publisher's copyright statement:**

©2021 by Brazilian Journals Publicações de Periódicos e Editora. All rights reserved.

DIRETORIA DE TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO

Cidade Universitária Zeferino Vaz Barão Geraldo

CEP 13083-970 – Campinas SP

Fone: (19) 3521-6493

<http://www.repositorio.unicamp.br>

## **Mapeamento de detritos Espaciais: Consequência ao Meio Ambiente e ao Programa Espacial**

### **Mapping of Space Debris: Consequences to the Environment and the Space Program**

DOI:10.34117/bjdv7n8-379

Recebimento dos originais: 07/07/2021

Aceitação para publicação: 02/08/2021

**Letícia Camargo de Moraes**

Graduação em Engenharia Ambiental

Universidade Estadual Paulista ICT – UNESP/SJC, São José dos Campos-SP

**Jorge Kennety Silva Formiga**

Doutorado

Universidade Estadual Paulista ICT – UNESP/SJC, São José dos Campos-SP

jorge.formiga@unesp.br

**Fabiana Alves Fiore Pinto**

Doutorado

Universidade Estadual Paulista ICT – UNESP/SJC, São José dos Campos-SP

fabiana.fiore@unesp.br

**Denilson Paulo Souza dos Santos**

Doutorado

Universidade Estadual Paulista, UNESP-SJBV

denilson.santos@unesp.br

**Vivian Silveira dos Santos Bardini**

Doutorado

Faculdade de Tecnologia-UNICAMP-SP

bardini@unicamp.br

#### **RESUMO**

O presente trabalho apresenta um modelo matemático para determinar a trajetória dos detritos espaciais e as informações de reentrada caso ocorra o fenômeno. Inicialmente, foi realizada uma pesquisa na legislação com o intuito de observar se o detrito espacial é tratado como resíduo. O segundo passo foi por meio de pesquisas, construir uma base histórica da queda do detrito, que demonstrou um aumento na queda deles ao longo dos anos. A base possibilitou a construção de um mapa indicando a localização das quedas e a definição de resíduos mais recorrentes tais como: tanques e estruturas, no qual pode-se descrever aspectos ambientais associados à queda dos detritos espaciais. Deste modo, construiu-se um modelo que indica se houve ou não a reentrada do possível detrito, considerando diferentes condições iniciais. Além disso, foi realizada uma pesquisa sobre a composição dos detritos espaciais mais recorrentes de queda, de acordo com a base de dados construída.

**Palavras-chave:** modelo matemático, detritos espaciais, legislação e resíduos recorrentes.

## ABSTRACT

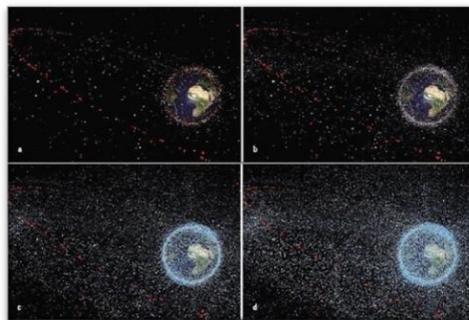
This present work presents a mathematical model to determine the trajectory of space debris and reentry information if the phenomenon occurs. Initially, a research was carried out in the legislation in order to observe if the space debris is treated as waste. The second step was through research, to build a historical basis for debris fall, which has shown an increase in debris fall over the years. The base allowed the construction of a map indicating the location of the falls and the definition of more recurring residues such as: tanks and structures in which environmental aspects associated with the fall of space debris can be described. Thus, a model was built that indicates whether or not the possible debris was reentered, considering different initial conditions. In addition, a survey was conducted on the composition of the most recurrent falling space debris, according to the built database.

**Key words:** mathematical model, space debris, legislation and recurrent residues.

## 1 INTRODUÇÃO

O acúmulo de detrito espacial é altamente afetado por fragmentos de objetos massivos, como naves espaciais intactas, corpos de foguetes entre outros fragmentos de corpos naturais. Estes fragmentos ocupam muito espaço, quando em órbita, e podem prejudicar os objetos que estão ativos, tais como: sondas, satélites e até mesmo a estação espacial. No ano de 2016, segundo a Agência Espacial Europeia, haviam cerca de 7500 toneladas de detrito espacial sendo monitorados em órbita ao redor da Terra. Parte desta evolução pode ser vista na fig.1.

Figura 1: Evolução da população de detritos espaciais rastreados, publicado em janeiro de 2017.



Fonte: ESA (2017).

Entre as diversas formas do surgimento destes detritos, a maior contribuição se dar a partir da inativação de equipamentos espaciais, ou choque entre veículos espaciais

(ativos ou inativos) que estão em órbita, segundo Blockley; Shyy (2010), um dos fatores recorrentes de preocupação ambiental.

Os impactos ambientais relacionados aos detritos espaciais podem ocorrer em determinados estágios: no lançamento do equipamento e inserção orbital, na órbita, ou seja, quando está operando, e no final da vida útil, com a possível reentrada. Desta forma, pode ocorrer contaminações nas camadas da atmosfera, no solo e na água, devido a presença de sólidos (em sua maioria metais), de líquidos tóxicos e de gases gerados a partir da queima de combustíveis (DURRIEU S.; ROSS N., 2013).

Resíduos, ou restos gerados nas atividades humanas, em sociedade que podem estar em diferentes estados físicos, em geral são classificados quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente, à saúde pública e quanto à origem de geração. No país, o lixo espacial não está disposto em uma classe específica quanto à origem de geração, mesmo já tendo ocorrido a queda desse tipo de material no território (BRASIL, 2010; ABNT, 2004). Autores como Costa et al. 2021, estudam o mapeamento de resíduos para cidade inteligentes, através um sistema que tem por objetivo permitir que os cidadãos façam denúncias da existência de descartes de resíduos sólidos em locais impróprios.

Considerando a legislação internacional e nacional, não foi encontrado procedimentos para realizar o manejo desses restos, e nem mesmo correlações entre as denominações de detrito espacial e de resíduos sólidos. No entanto, se considerada a definição de resíduos sólidos, pode-se inferir que a mesma se aplica para os detritos espaciais, já que esses são resultantes de atividades humanas, a partir de atividades espaciais e necessitam de uma destinação adequada, para não afetar a vida útil de outros equipamentos que estão em órbita, o meio ambiente e a sociedade, caso a reentrada e posterior queda ocorra.

Avaliar as trajetórias destes detritos espaciais antes da sua reentrada na Terra é de suma importância para identificar o que a condição de lançamento interfere no final de sua trajetória. Para tal monitoramento neste trabalho foi utilizado o problema restrito de três corpos, que consiste em uma forma de identificar a trajetória do detrito ao longo do tempo considerando o efeito gravitacional da Terra e da Lua. A modelagem de sua trajetória, nos permite identificar a trajetória de queda de alguns detritos o qual através de mecanismos espaciais, evitar ou reduzir danos ao meio ambiente.

O principal objetivo deste trabalho é apresentar a viabilidade de um modelo numérico computacional na determinação de trajetórias de resíduos espaciais, bem como

avaliar trajetória de reentrada de detritos considerando o efeito gravitacional da Terra e da Lua e identificar a composição dos resíduos espaciais de maior recorrência

## 2 METODOLOGIA

O levantamento das informações sobre os resíduos espaciais, tais como: tamanho, local da queda e a ocorrência de impacto negativo dos resíduos espaciais, foi feito através uma pesquisa realizada no Google, em três diferentes idiomas por meio de 36 palavras-chave, dentre elas “lixo espacial caiu na superfície” e “impacto da queda de lixo espacial”, para o período de 53 anos partido de 1965. Através destas informações um banco foi elaborado, considerando apenas os detritos que reentraram e foram registrados.

Em seguida, foram realizadas pesquisas sobre a existência de leis, que retratassem sobre a caracterização das estruturas espaciais inativas como resíduos, e se havia algum direcionamento sobre a disposição dos mesmos. As buscas também foram realizadas no Google com palavras-chave como “lei resíduo espacial”, “lei detritos espaciais”, “lei espacial” em russo, espanhol, inglês e português.

### 2.1 APLICAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO

O modelo utilizado neste trabalho, foi baseado P3C, onde a Terra é o corpo central ( $m_1$ ), a lua é o corpo secundário ( $m_2$ ) e o detrito tem massa desprezível ( $m_3$ ). As perturbações envolvidas são: o corpo  $m_1$  considerando  $J_2=1,0826 \times 10^{-3}$  e  $C_{22}=1,24538 \times 10^{-5}$  e o arrasto atmosférico.

As equações 1 e 2 representam as acelerações totais nos eixos x e y do corpo que está submetido a todas as perturbações supracitadas,

$$\ddot{x} = -2n\dot{y} + n^2x - \frac{\mu_1 R_e^2}{r^3} x - \frac{3\mu_1 R_e^2}{2r^5} x J_2 - (2 - 5(x^2 - y^2)) \frac{3\mu_1 R_e^2}{r^6} x C_{22} - \frac{\mu_2}{r^3} (x - x_2) + D \quad (1)$$

$$\ddot{y} = -2n\dot{x} + n^2y - \frac{\mu_1 R_e^2}{r^3} y - \frac{3\mu_1 R_e^2}{2r^5} y J_2 - (2 + 5(x^2 - y^2)) \frac{3\mu_1 R_e^2}{r^6} y C_{22} - \frac{\mu_2}{r^3} (y - y_2) + D \quad (2)$$

Onde  $n$  é o movimento médio,  $r$  é a distância do detrito espacial até a Terra,  $R_e$  é o raio da Terra,  $\mu_1$  é o parâmetro gravitacional e  $D$  é a força de arrasto.

De acordo com Curtis (2010), a equação da Força de Arrasto (3) representa uma das forças que podem atuar em oposição ao movimento, resultando em uma aceleração negativa para o corpo.

$$\vec{D} = -\frac{1}{2}\rho C_D S v_R \vec{v}_R \quad (3)$$

Sendo,  $\rho$  massa específica do fluido,  $C_D$  coeficiente de arrasto,  $S$  área de superfície,  $v_R$  intensidade da velocidade do corpo em relação ao fluido, e  $\vec{v}_R$  vetor velocidade.

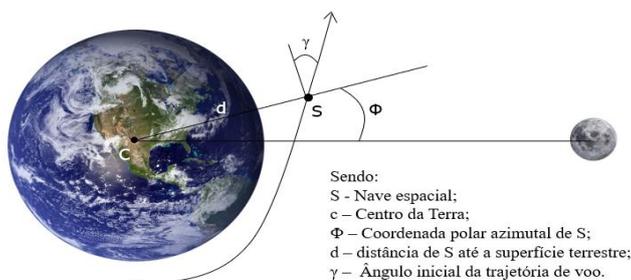
As acelerações obtidas foram convertidas em elementos keplerianos, semi-eixo maior ( $a$ ) e na excentricidade ( $e$ ), onde foi possível também determinar a energia do detrito e distância da Terra e da Lua, permitindo avaliar o risco de colisão com um dos corpos primários.

### 2.3 SIMULAÇÕES

Com o objetivo de avaliar a reentrada de alguns detritos, foram realizadas diversas simulações utilizando modelo dado pelas equações 1-3, variando as condições iniciais. Os resultados simulados para 6 meses e 1 ano, partindo do ponto S representado na Figura 2. Este tempo foi escolhido com ideia de verificar os efeitos em curto intervalo de tempo.

Os resultados obtidos consideraram quatro trajetórias, partindo inicialmente conforme figura 2, seguindo os quatros casos: 1) sem  $J_2$ ,  $C_{22}$  e arrasto; 2) com  $J_2$  e  $C_{22}$ ; 3) com arrasto; 4) com  $J_2$  e  $C_{22}$  e arrasto.

Figura 2: Ilustração das condições iniciais



Fonte: Própria (2019).

De início foram testados dois ângulos iniciais de trajetória de voo  $60^\circ$  e  $180^\circ$  e a coordenada azimutal foi testada de  $0^\circ$  a  $360^\circ$ , variando de  $10^\circ$  em  $10^\circ$  (Tabela 2). A altitude inicial simulada foi de 200 km, velocidade inicial de 10,9148 km/s para todos os testes e o tempo de trajetória foi variado, para alguns casos, para verificar as diferenças entre as trajetórias. A Figura 2 ilustra as coordenadas iniciais do objeto espacial.

Tabela 2: Condições iniciais para as simulações de destaque

Simulação	Altitude(km)	$\Phi$ (graus)	$\gamma$ (graus)	Velocidade inicial $V_0$ (km/s)	Tempo de voo (dias)
R1	200	$-40^\circ$	$60^\circ$	10,9148	360
R2	200	$-20^\circ$	$60^\circ$	10,9148	180
R3	200	$-20^\circ$	$60^\circ$	10,9148	720
R4	200	$-50^\circ$	$180^\circ$	10,9148	360

Analisando algumas simulações, foi observado que não houve diferenciação na trajetória com e sem a presença do arrasto, em períodos curtos de análise, e elevadas altitudes, o que colabora para o efeito gravitacional prevalecer para grandes altitudes, acima do efeito do arrasto. Deste modo, foram escolhidos alguns casos para discutir sobre a diferenciação com a presença das componentes  $J_2$  e  $C_{22}$ . Referente a colisão ou captura, não foi encontrado nenhum caso considerando uma altura mínima de 50 km.

Os resultados da primeira simulação, R1, podem ser vistas nas Fig. 3-6. Com altitude inicial (200 km), considerando sua coordenada azimutal  $-40^\circ$  e ângulo inicial de trajetória  $60^\circ$ , nota-se na Figura 3, que o detrito sem a considerar  $J_2$  e  $C_{22}$ , está afastando da Terra mais lentamente do que com os harmônicos, mas os dois estão sob condição de captura, evidenciado pela energia negativa (Figura 6), como também apresentam raras variações no semieixo, apenas indicando o pico de variação quando há variação de energia (Figura 4). Já na figura 6, podemos confirmar a evolução das trajetórias ao redor da Terra nas diferentes condições em que o detrito foi simulado. Neste caso a força de arrasto não foi suficiente para promover uma reentrada na Terra.

Figura 3: Distância da terra ao longo do tempo

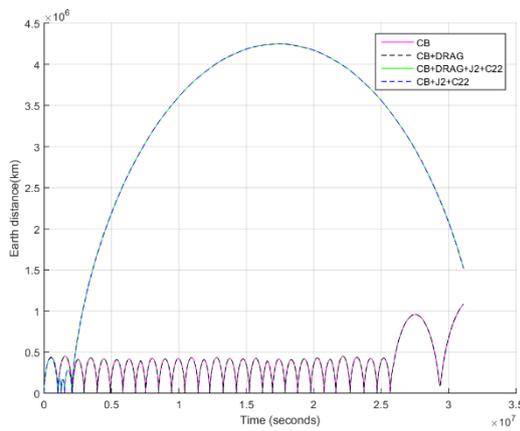


Figura 4: Valor do semieixo ao longo do tempo

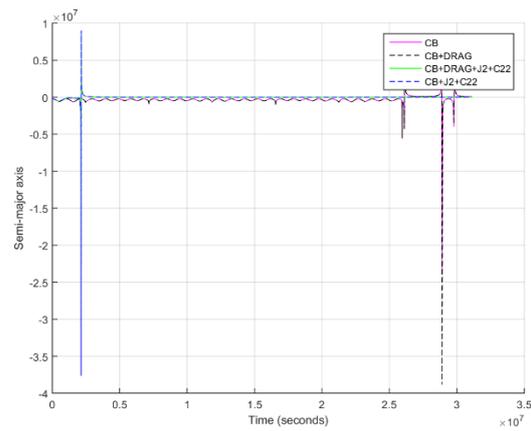


Figura 5: Trajetória do detrito

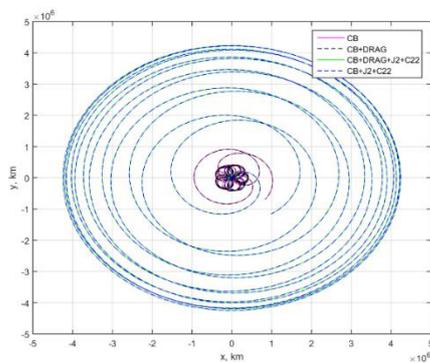
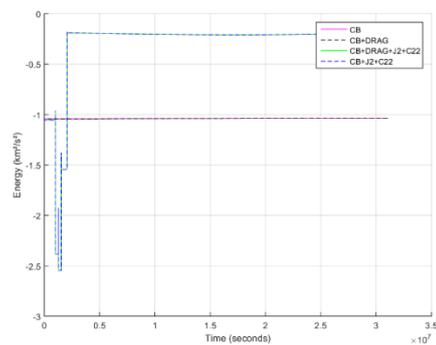


Figura 6: Variação de energia ao longo do tempo



No segundo resultado, apresentado pelas Figuras 7-10, foi simulado um tempo de 180 meses para observar se houve muita diferença do caso anterior. Nota-se que as trajetórias sem  $J_2$  e  $C_{22}$ , praticamente não aparecem, por estarem bem mais próximas a Terra (Figura 7). Observando a Figura 8 e 10, considerando o detrito sob efeito de  $J_2$  e  $C_{22}$ , sofre escape no tempo de aproximadamente 1 ano e 45 dias, devido ao salto de energia, para um valor positivo, o que proporcionou o afastamento da Terra em longo prazo (ver Fig 8). Com o distanciamento da Terra, as trajetórias  $CB+J_2+C_{22}+$ arrasto e  $CB+J_2+C_{22}$  (Figura 8) não apresentam distinção, pois o arrasto não apresenta mudança significativa já que a distância da Terra está muito elevada e o efeito do arrasto se torna praticamente nulo. Este efeito do arrasto é esperado por ser um efeito de longo período.

Figura 7: Distância da terra ao longo do tempo

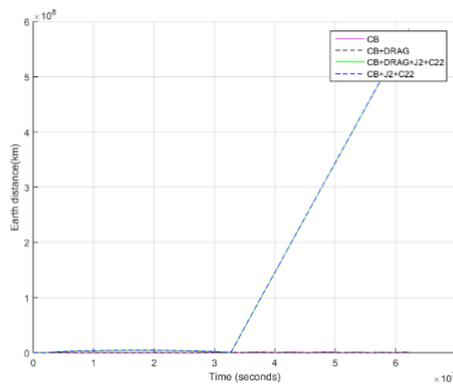


Figura 8: semieixo ao longo do tempo

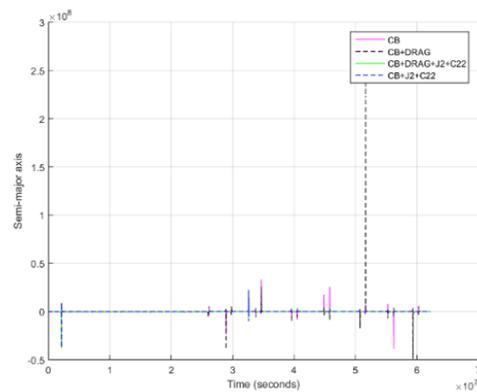


Figura9: Trajetória do detrito

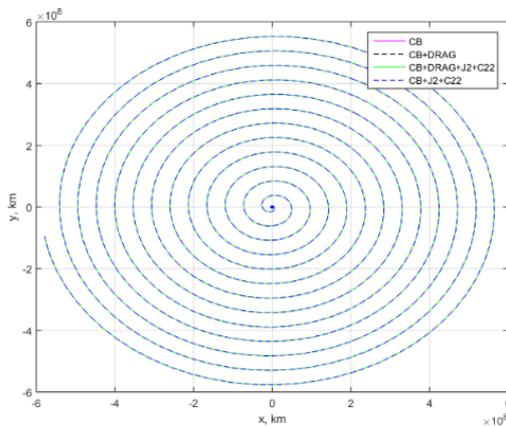
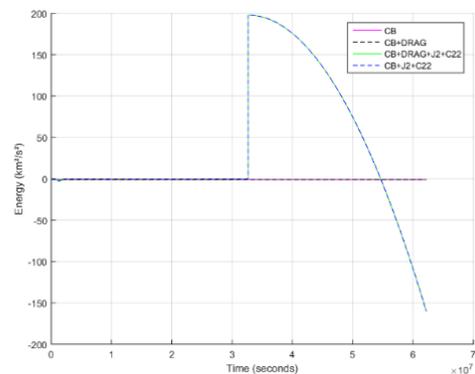


Figura 20: Variação de energia ao longo do tempo



Avaliando a simulação R3, através das Figuras 11-14, trajetórias de cor rosa (P3C) e preto (P3C + arrasto) tiveram o mesmo comportamento. Isto este resultado foi possível porque o tempo de integração não foi suficiente para demonstrar o efeito do arrasto. Assim como a trajetória verde (P3C + J2 + C22 +arrasto) e a azul (P3C + J2) que também são iguais (Figura 13), mostrando que o arrasto não mudou significativamente a trajetória do detrito no período de 180 dias. Já comparando a adição ou não do efeito dos harmônicos atmosféricos (J2 + C22), a situação que considera somente efeito gravitacional (P3C) ficou mais afastada da Terra durante o tempo de análise, mostrando que o efeito de atração gravitacional foi mais forte para a trajetória quando o efeito do arrasto atmosférico foi considerado. Houve um pequeno salto de energia identificado na Figura 14, em que o objeto sem J<sub>2</sub> e C<sub>22</sub> teve um ganho de força e afastou da Terra.

A partir deste mesmo instante é notável a diferenciação das distâncias da Terra nas trajetórias simuladas (Figura 11 e 13). Acredita-se que o arrasto não foi diferenciado nas trajetórias devido a dois motivos: O tempo simulado foi curto e o efeito do arrasto não se

tornou significativo, e como a altitude de voo foi elevada o efeito gravitacional foi bem maior que o arrasto.

Figura 11: Distância da terra ao longo do tempo

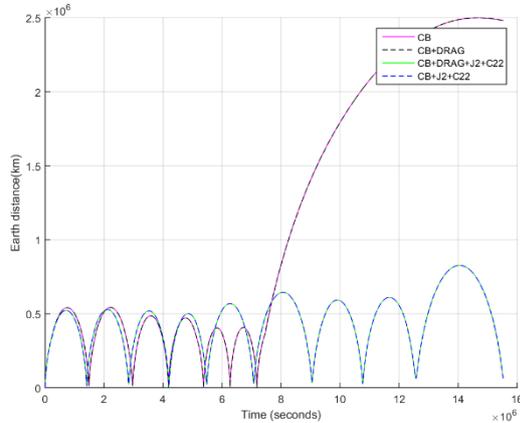


Figura 13: Trajetória do detrito

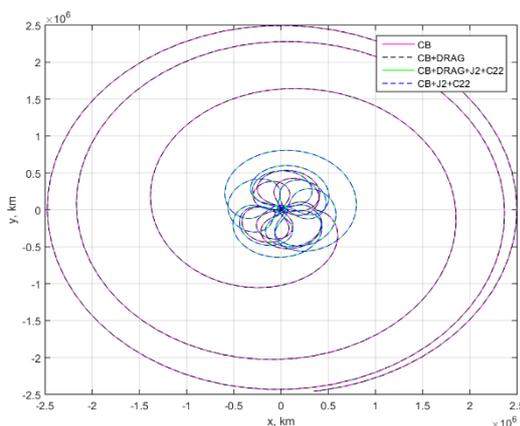


Figura 12 semieixo ao longo do tempo

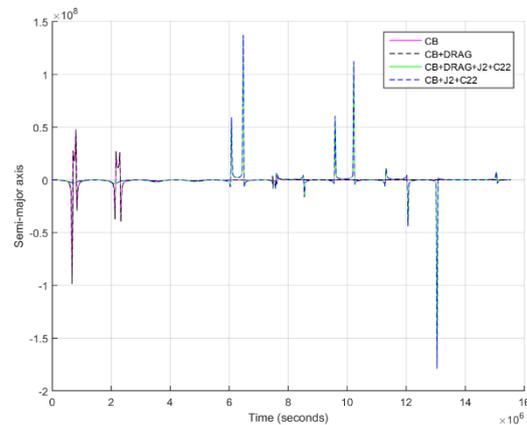
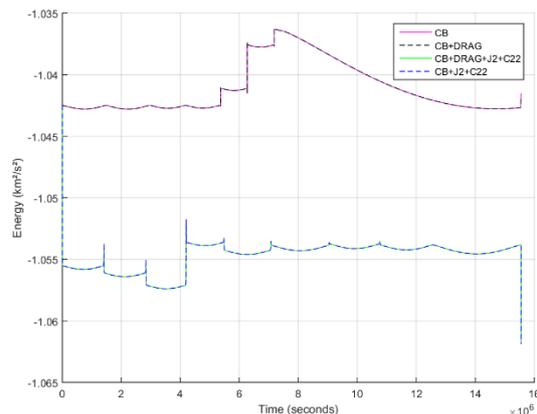


Figura 14: Variação de energia ao longo do tempo



Com o objetivo de avaliar a diferença entre os resultados com e sem o arrasto, foi simulado as mesmas condições iniciais para um tempo de 3 anos somente para as trajetórias que não apresentavam  $J_2$  e  $C_{22}$ . Foi escolhido a condição sem  $J_2$  e  $C_{22}$ , pois o arrasto poderia apresentar maior interferência sob o objeto, devido sua menor distância da Terra. Deste modo sendo mais afetado pelo arrasto atmosférico. Estas simulações podem ser vistas nas Figuras 15-18, os quais os resultados apresentaram uma pequena diferença após 1 ano e meio aproximadamente (Figura 15). Observa-se que inicialmente todas as trajetórias mostram um pico de energia (Figura 18), o qual é responsável pela mudança brusca na característica orbital, representada na figura 16. Porém, é observado que, após 1 ano e meio a trajetória considerando o efeito do arrasto, apresentou um decaimento na altitude, vistas tanto na figura 15 e 17. Isto mostra um decaimento na

altitude do distrito devido ao arrasto atmosférico sob as condições apresentadas na simulação R4.

Figura 15: Distância da terra ao longo do tempo

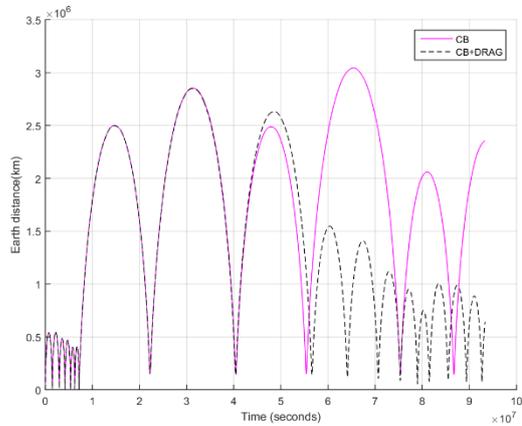


Figura 16: semieixo ao longo do tempo

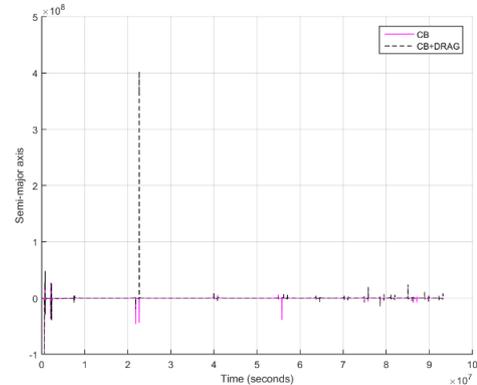


Figura 17: Trajetória do detrito

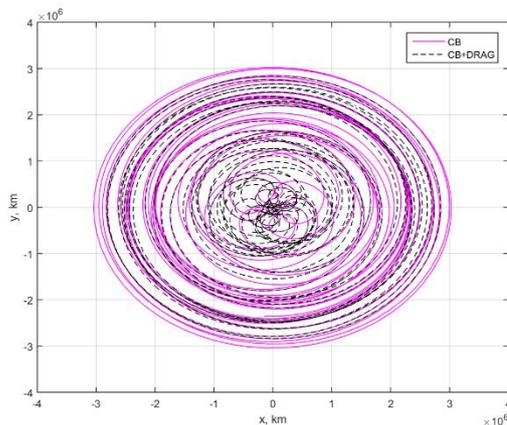
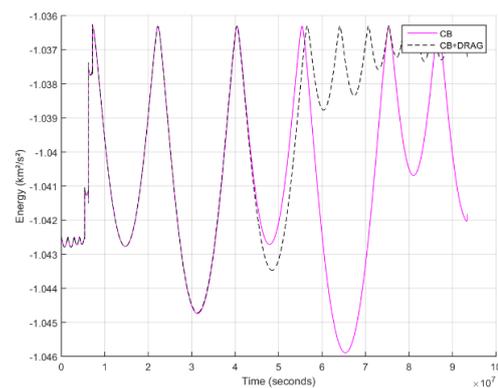


Figura 18: Variação de energia ao longo do tempo



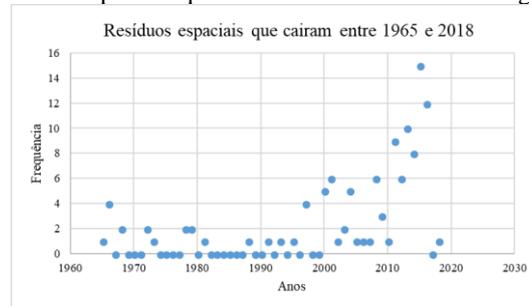
Com estes resultados é perceptível a importância da modelagem para verificar o comportamento do objeto ao longo dos anos, pois em grande parte dos resultados a tendência não é simplesmente determinada com simulações de tempo de voo reduzidos. O que nos mostra até aqui a importância de acompanhar as trajetórias destes detritos e entender como o efeito do arrasto pode provocar uma reentrada do mesmo, bem como se o corpo vai escapar para outra órbita.

## 2.4 EVOLUÇÃO DOS RESÍDUOS ESPACIAIS

A partir da base de dados construída foi possível verificar que a taxa de resíduos espaciais que caem está aumentando nos últimos anos (Gráfico1). Nos dois últimos anos

apresentou valores menores, porém acredita-se que decorre da não divulgação das quedas por falta de comprovação.

Gráfico 1: Quantidade de resíduos espaciais que caíram em cada anos ao longo dos anos entre 1965 e 2018.



O Brasil, até o presente trabalho, não apresenta lei que estabelece diretrizes relativas ao manejo dos resíduos espaciais. Segundo a legislação Russa as atividades espaciais não podem causar poluição prejudicial do espaço exterior, levando a mudanças no ambiente, incluindo intencionalmente a eliminação de objetos espaciais no espaço. Deste modo, os objetos inativos não devem permanecer em órbita após sua desativação, sendo responsabilidade da organização que instaurou os equipamentos, porém as leis não retratam a forma de captura desses detritos.

Conforme o levantamento realizado, é possível observar, no Gráfico 2, resíduos mais recorrentes os quais destacamos: os tanques, as estruturas, os propulsores e os satélites.

Gráfico 2: Mapeamento dos tipos de resíduos que caíram entre os anos de 1965 e 2018.



O resíduo com maior recorrência de queda foi o tanque. Na maioria das vezes compostos de níquel esses tanques são utilizados para a propulsão ou como reservatórios de combustível. Outro resíduo, que sofre a queda constantemente é estrutura, que consiste em carcaças de foguete, satélite e ônibus espaciais. São resíduos facilmente identificáveis,

pois geralmente se localiza a identificação do aparelho em sua estrutura. Em sua composição há tintas e outros materiais metálicos.

Na tabela 2 consta a maior parte dos aspectos e impactos ambientais associados aos detritos espaciais. Na fase do objeto ativo a maior parte dos impactos é positiva e se relacionam com o fornecimento de informações importantes para a população, tais como: monitoramento ambiental, emprego para a população, análise de imagens, informações sobre o planeta, condições climáticas, entre outros. Isso é um dos fatores que colaboram muito para que a atividade espacial continue, pois é muito importante ter informações sobre a Terra em tempo real.

Na fase de inativação muitas informações sobre o equipamento são perdidas e esses passam para a inferir impactos negativos relevantes novamente. Nessa fase, geralmente os objetos são explodidos, e produzem uma nuvem, e podem piorar ainda mais a qualidade na órbita para equipamentos ativos. Como a velocidade desses detritos em sua maioria são elevadas, o choque pode provocar a inativação de equipamentos em atividade, além disso, os equipamentos inativos em órbita podem retornar para a Terra e provocar danos em plantações, contaminação de rios e oceanos, ou até mesmo acidentes com os seres humanos na sua queda.

Consideradas as composições dos resíduos espaciais recorrentes e a norma técnica brasileira (NBR 10.004/2004), que estabelece a classificação quanto aos riscos potenciais riscos à saúde humana e ambiental, é possível inferir que caso haja residuais de combustíveis nos reservatórios o material pode inferir risco de inflamabilidade. Em função da presença do constituinte níquel, os tanques são potencialmente tóxicos. Sendo assim, tais resíduos podem ser classificados como perigosos e demandantes de manejo adequado para que seus impactos não sejam manifestos. Com relação às tintas, presentes na carcaça dos veículos, as informações relativas às suas composições são fundamentais para a descrição dos potenciais impactos ambientais correlatos. Por fim, destaca-se que as questões relacionadas aos riscos ambientais dos resíduos espaciais se assemelham àquelas estabelecidas pelos demais veículos automotores, cuja destinação é precariamente regulamentada e controlada no país.

Tabela 2: Tabela de Aspectos e Impactos Ambientais (vermelho= negativo; verde=positivo)

Estágios	Aspectos Ambientais	Impacto Ambiental	Nível do impacto
Lançamento	Emissão de gases	Alteração da composição da atmosfera	Red
		Aumento do efeito estufa	
	Emissão de particulado	Aumento da taxa de saturação da atmosfera	
		Formação de pluma de materiais tóxicos para aves	
	Liberação de alumina	Aumento do efeito estufa	
		Produção de fina camada que intercepta e absorve luz solar	
	Liberação de querosene Geração de carbono negro (fuligem) Proximidade do equador	Esgotamento da camada de ozônio (aumenta câncer de pele e catarata)	
Explosões de materiais			
Mudança climática na Terra			
Vida Útil	Atividades tecnológicas	Redução da qualidade das imagens de equipamentos ativos	
		Menor utilização de combustível	
	Geração de Imagens	Geração de empregos	Verde
		Monitoramento ambiental de áreas	Verde
Choque de objetos	Experimentos científicos	Verde	
	Avanços tecnológicos	Verde	
Objeto Inativo	Queda na superfície terrestre	Redução da incidência solar	Red
		Formação de nuvem tóxica	
	Queda na superfície aquática	Ferir seres vivos	
		Danos a plantações	
	Permanência na atmosfera	Contaminação de solo	
		Contaminar rios	
	Liberação de urânio 235	Aquecer águas superficiais	
		Contaminar o freático	
Liberação de Plutônio 238	Alteração da qualidade da atmosfera		
	Contaminação a atmosfera		
Presença de muitos objetos	Contaminação a atmosfera		
	Síndrome de Kessler (choque de objetos)		
Nuvens de detritos	Redução da passagem de luz		
	Excesso de equipamento em órbitas baixas	Inviabilização de locais para utilização	

### 3 CONCLUSÕES

Os estudos relacionando os detritos espaciais com a questão ambiental ainda são muito voltados para os interesses espaciais, pois a maioria dos estudos refletem no interesse humano de continuar com a atividade espacial sem prejudicá-la. A preocupação com a questão do meio que está sendo contaminado com gases, sólidos e líquidos é rara, mas já se sabe que parte desses compostos volta para o planeta e simplesmente não possuem normas que delimitem o que pode ou não ser feito com esse resíduo.

Os aspectos e impactos refletem muito no futuro cenário que a questão ambiental pode levar, pois o espaço já possui muitos objetos e não há um planejamento de destinação para esses resíduos. Além dos impactos ambientais que podem ocorrer na superfície terrestre com a queda desses materiais sem um devido controle pré-queda há

que se atentar para os custos e aos entraves políticos e sociais associados à não regulamentação do setor.

O modelo matemático se faz muito importante para o monitoramento do detrito, já que muitos deles não possuem monitoramento constante pós-vida útil. Deste modo, pode-se obter as condições iniciais para o modelo através de outros equipamentos ativos e simular o que irá ocorrer com detrito ao longo dos anos, para ter a realização de um bom planejamento antes que o mesmo sofra queda na superfície.

Em relação ao modelo, com a inclusão de novas variáveis a trajetória simulada se aproxima da real. Nota-se que somente o arrasto geralmente não altera a trajetória dos detritos em altitudes elevadas, porém, em baixas altitudes o arrasto possui maior interferência na trajetória e altera um pouco a trajetória na atmosfera. Destaca-se que com essa pequena mudança pode-se alterar muito o local de queda do detrito. A alteração se dá devido a maior quantidade de substâncias no fluido que possibilita maior força de arrasto.

Os harmônicos atmosféricos alteram muito a trajetória, daí sua importância para a utilização no modelo, pois, com a adição o modelo se torna mais realista. Devido sua complexidade não é possível afirmar que sempre ocorrerá algum evento específico, pois em alguns casos o objeto se aproxima com a adição de  $J_2$  e  $C_{22}$  e em outros casos ocorre o escape do objeto com a adição de  $J_2$  e  $C_{22}$  ou simplesmente o afastamento da Terra. Dessa forma, acompanhar a trajetória dos detritos é de extrema importância para que se possa evitar danos a missões espaciais e até mesmo um dano ambiental após sua reentrada na Terra.

Além das variáveis incluídas no presente trabalho há outras que aproximam ainda mais a trajetória do objeto do real. Deste modo, é bom destacar que apesar dos resultados apresentarem uma aproximação com a realidade ainda há outras variáveis que tornariam o trabalho mais próximo realista. Uma das alternativas que o estudo pode ser aplicado é a coleta de detrito espacial, por exemplo, reduzindo assim, os problemas com excesso de detrito nas órbitas terrestres.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10004: Resíduos sólidos classificação, Rio de Janeiro, 2004.
2. BLOCKLEY, Richard; SHYY, Wei. ENCYCLOPEDIA OF AEROSPACE ENGINEERING, Fluid dynamics and Aerothermal dynamics. New York, EUA. Wiley, 2010.
3. BRASIL. DECRETO Nº 5.806, DE 19 DE JUNHO DE 2006. Promulga a Convenção Relativa ao Registro de Objetos Lançados no Espaço Cósmico. 2006.
4. BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. 2010.
5. CURTIS, H. Orbital Mechanics for Engineering Students. 2º ed. Flórida, EUA. ELSEVIER, 2010.
6. Durrieu S.; Ross N.. Earth observation from space – The issue of environmental sustainability. Disponível em:  
<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0265964613000659>>.
7. KUGA, Hélio et al. INTRODUÇÃO À MECÂNICA ORBITAL. 2º ed. São José dos Campos: INPE, 2008.
8. MALEY'S, Paul. SPACE DEBRIS PAGE. Disponível em:  
<<http://eclipsetours.com/paul-maley/space-debris/>>. Acesso em: 16 de março de 2017.
9. Organização das Nações Unidas para a Educação, Ciência e cultura. Convenção para a proteção do patrimônio mundial, cultural e natural. 1972. Disponível em:  
<https://whc.unesco.org/archive/convention-pt.pdf>
10. Costa et al. Um Sistema de Denúncia de Descarte Irregular de Resíduos Sólidos, Brazilian Journal of Development, v.7, n.4, p. 39258-39275, 2021.