



*



**

Consequências da exploração espacial: detritos espaciais

Dr. Jean P. S. Carvalho
URFB/CETENS

***Centro de Ciência e Tecnologia em Energia e
Sustentabilidade***

jean.carvalho@ufrb.edu.br

* <https://www.cavok.com.br/espaco-uma-ideia-para-limpar-o-lixo-espacial>

** <https://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=nasa-teste-vela-solar&id=020130101207#.YK0BBKhKhPY>

A Engenharia das Missões Espaciais

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

INPE



VOCE ESTÁ AQUI: INPE / A ENGENHARIA DAS MISSÕES ESPACIAIS /

Curso de extensão

A Engenharia das Missões Espaciais

Início: 22 de setembro

Vagas Limitadas!

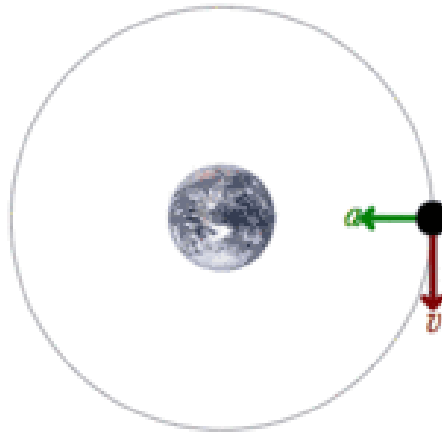


OBJETIVO:

- ❖ Definir lixo espacial
- ❖ Divulgar o problema do lixo espacial
- ❖ Comentar o perigo do lixo espacial
- ❖ Destacar algumas formas de mitigação do lixo espacial

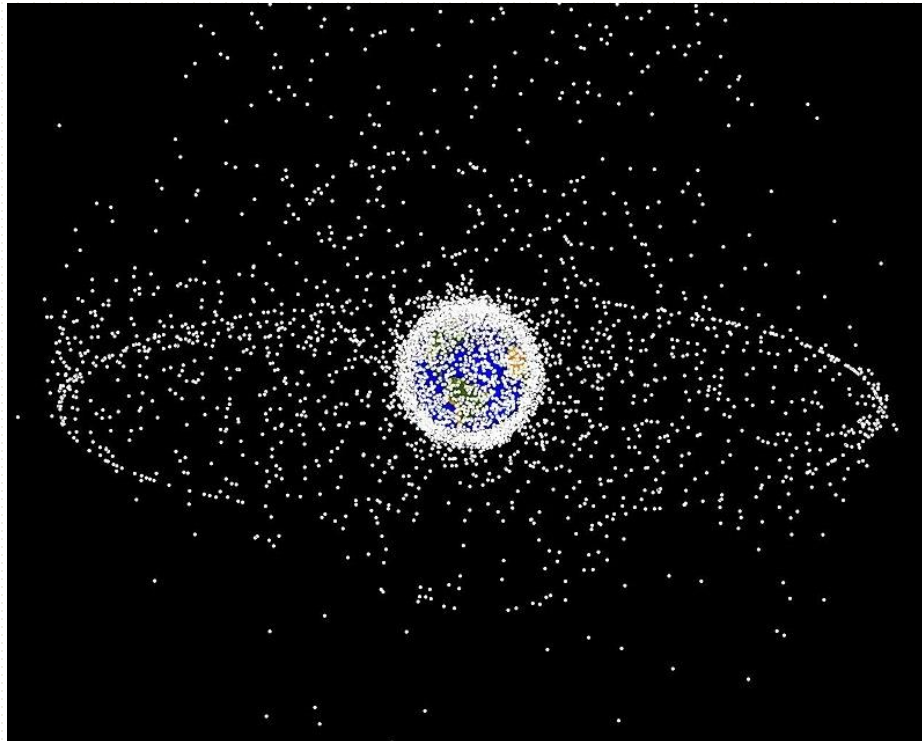


O ambiente espacial em torno da Terra está cheio de detritos espaciais, resquícios de missões espaciais, como estágios de foguetes, fragmentos de desintegrações, equipamentos perdidos, parafusos, flocos de tinta, peças eletrônicas, etc.



DETRITOS ESPACIAIS

Detritos Espaciais (lixo espacial) são todos objetos artificiais, incluindo fragmentos e seus elementos, na órbita terrestre ou reentrando na atmosfera, que não são funcionais (ESA, 2019).



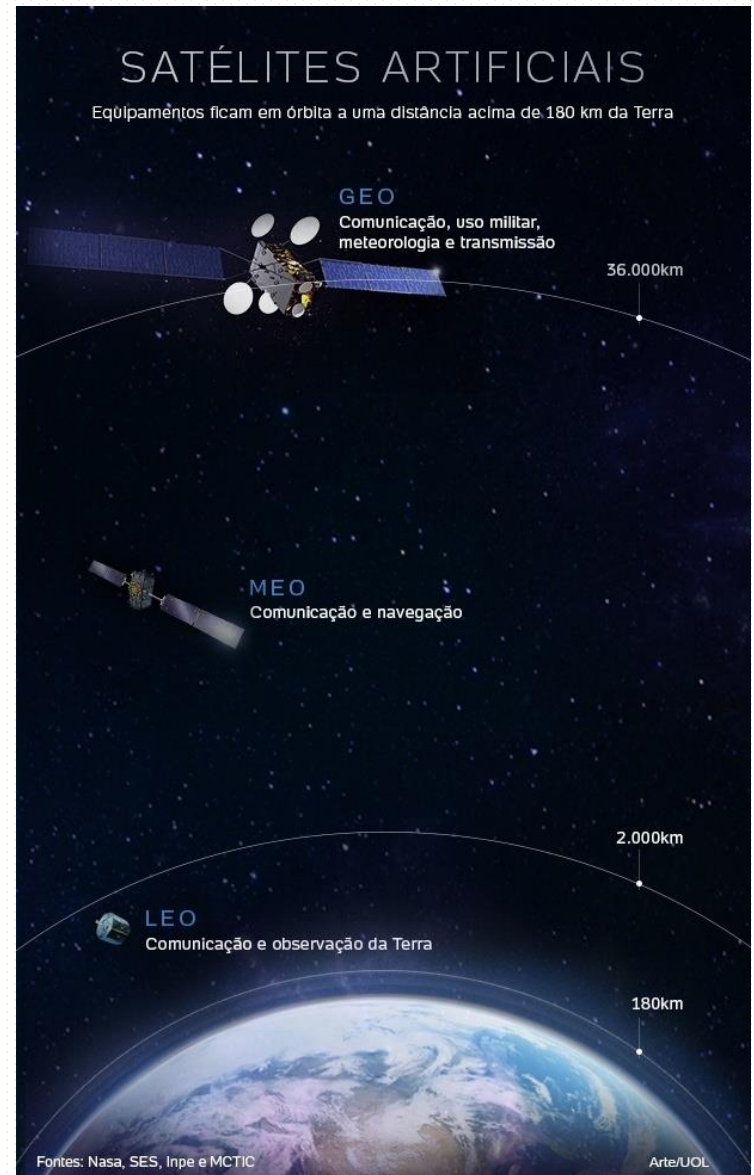
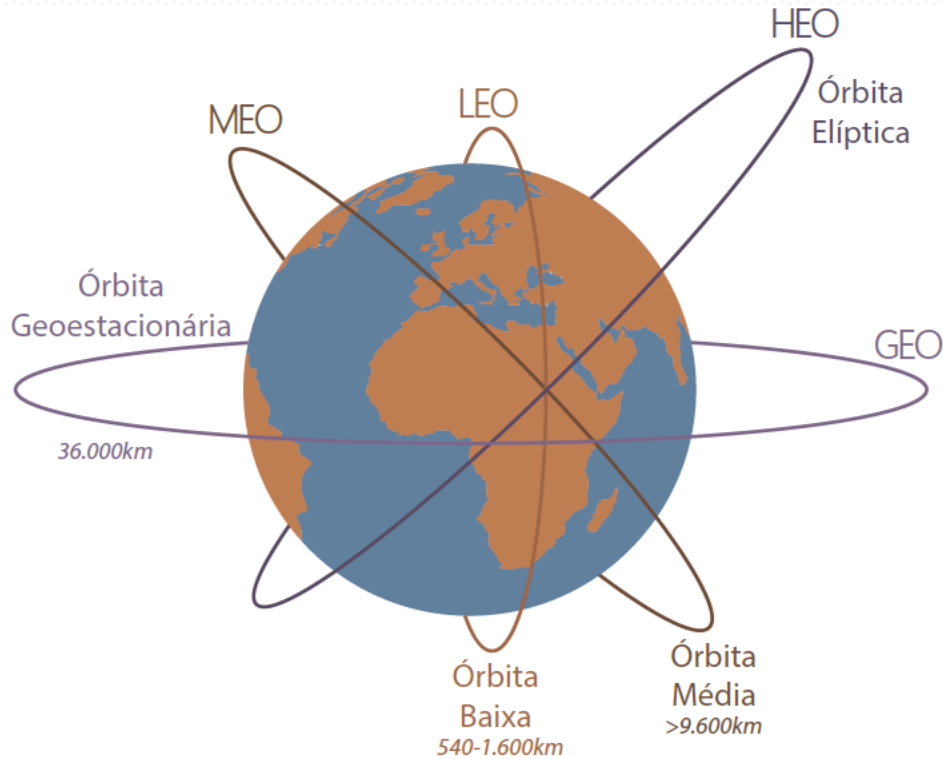
Por que estudar a dinâmica dos detritos espaciais?

- ❖ **Compreender a evolução orbital dos detritos espaciais**
- ❖ **Estratégias de mitigação**
- ❖ **Órbitas de eliminação de fim de vida**

ASPECTOS DA DINÂMICA DOS DETRITOS

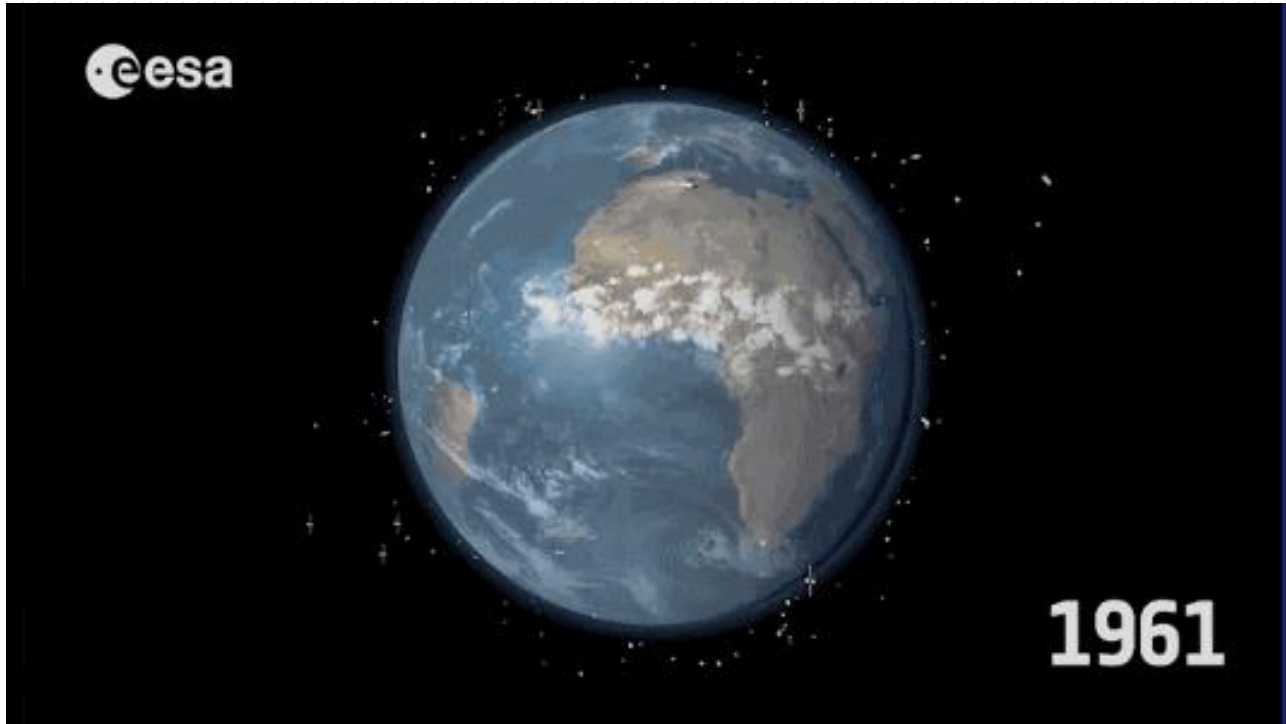
- ❖ **Regiões de estabilidade, para ter órbitas regulares e minimizar a interação futura com espaçonaves operacionais.**
- ❖ **Regiões de instabilidade, para provocar uma reentrada na atmosfera ou para se mover para uma órbita cemitério no final da vida operacional.**

TIPOS DE ÓRBITAS



Fonte: <https://bit.ly/37xAzQS>.

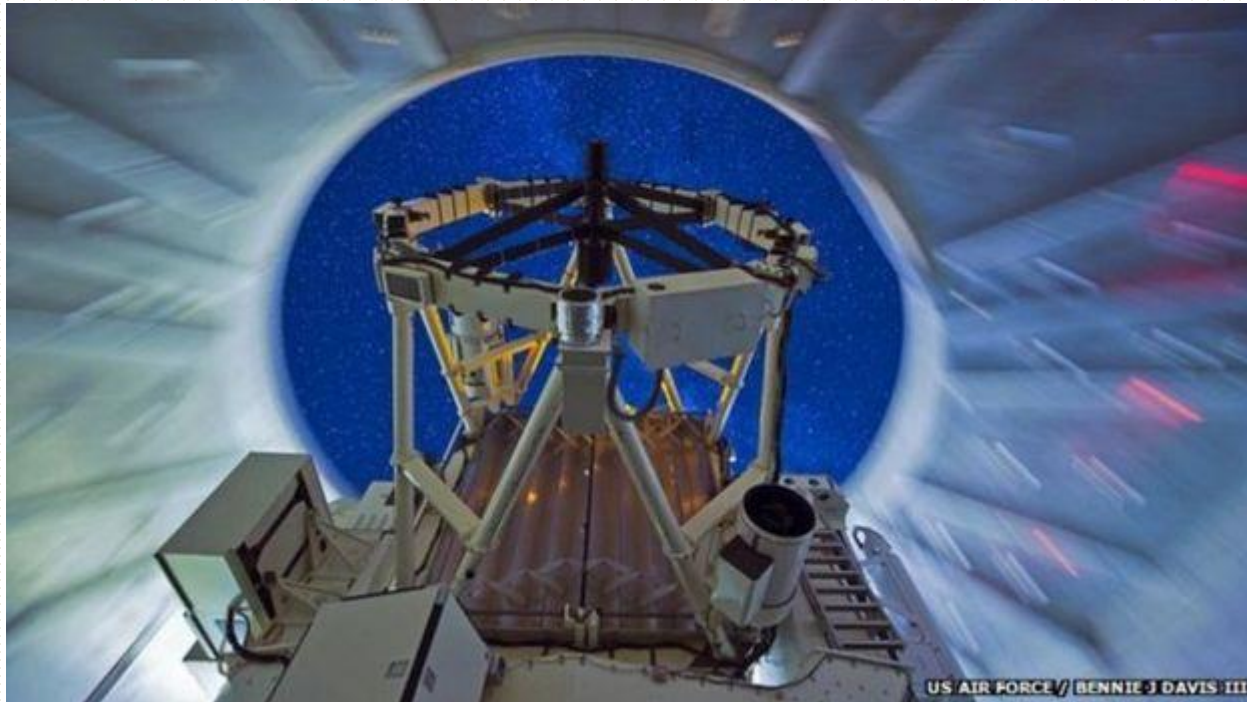
EVOLUÇÃO DO LIXO ESPACIAL



<https://www.megacurioso.com.br/ciencia/111890-orbita-da-terra-ja-acumula-quase-20-mil-detritos-espaciais.htm>

Rastreamento de detritos

EUA mantêm uma série de sensores, como este telescópio no Havaí, que monitoram detritos.

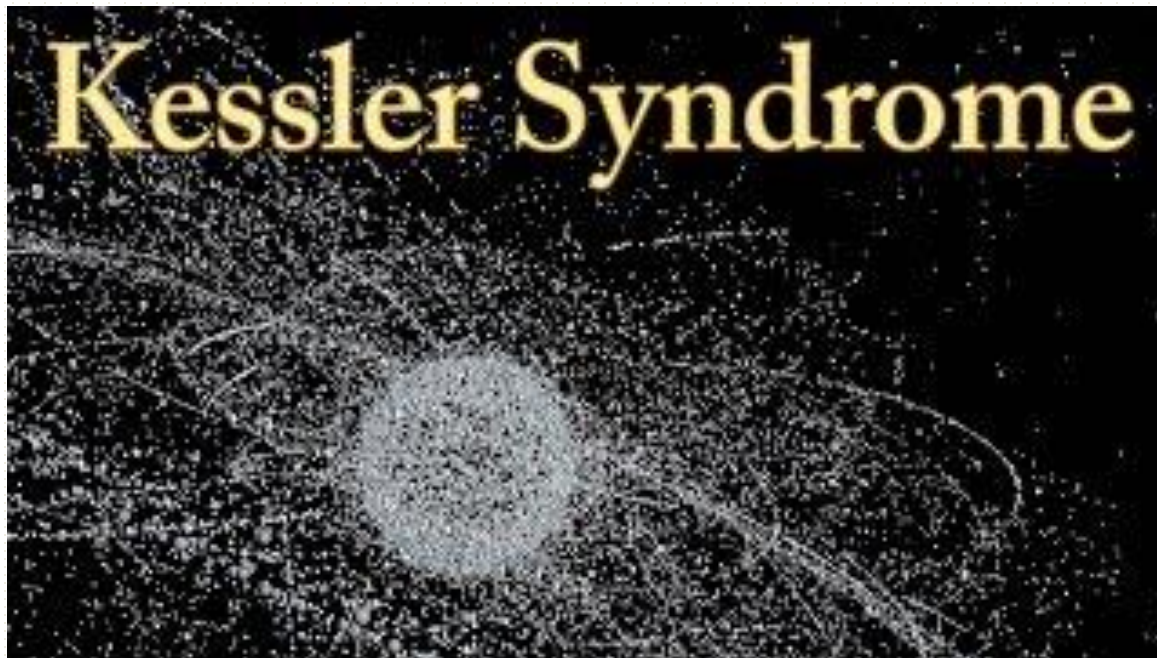


http://www.bbc.com/portuguese/noticias/2015/08/150806_lixo_espacial_ab

A SÍNDROME DE KESSLER

As colisões entre detritos provocam as condições para que ocorra a chamada síndrome de Kessler. Proposta pelo cientista Don Kessler, da Nasa, que identificou e descreveu o processo com Burton Cour-Palais em 1978.

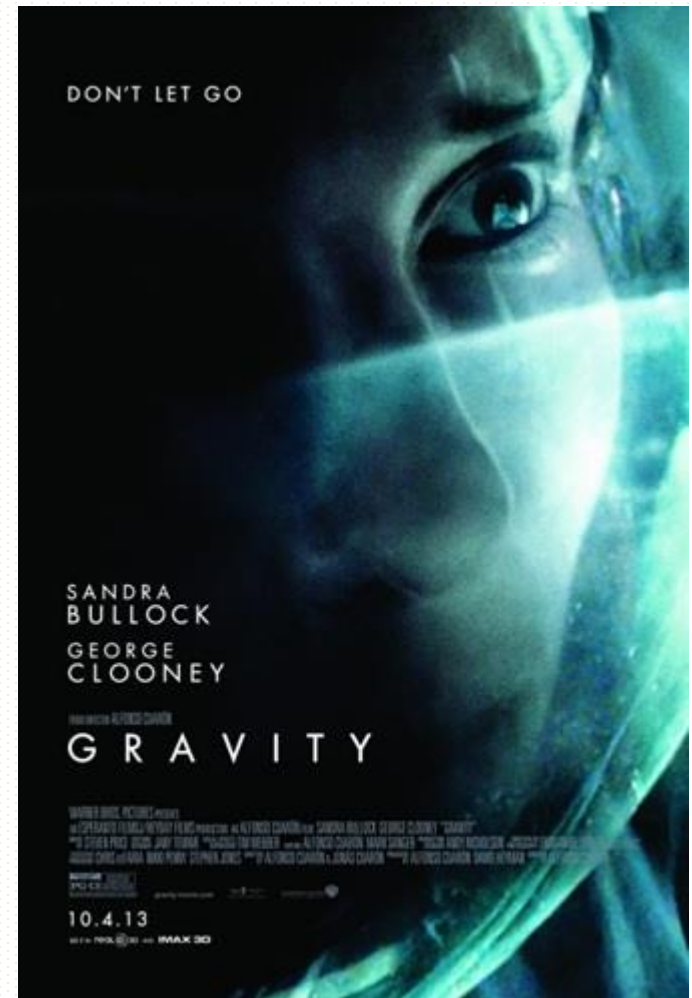
Efeito de colisões e reações em cadeia envolvendo os satélites e o lixo espacial.



Filme Gravidade

A ocorrência de colisões autossustentáveis é algo que o filme *Gravidade* também mostrou.

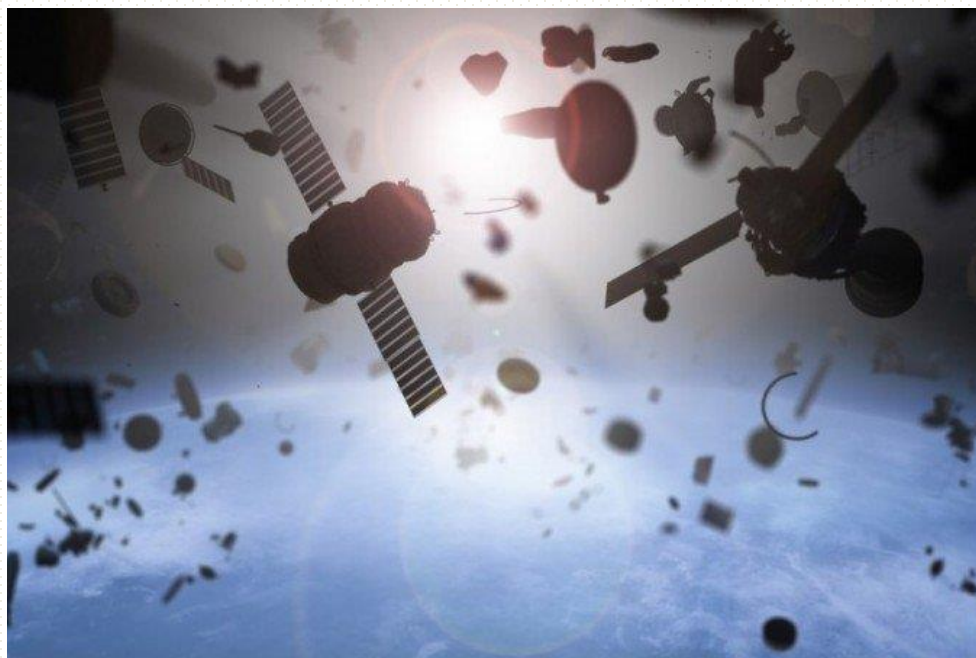
As reações em cadeia de colisões e fragmentações podem aumentar o risco das atividades espaciais.



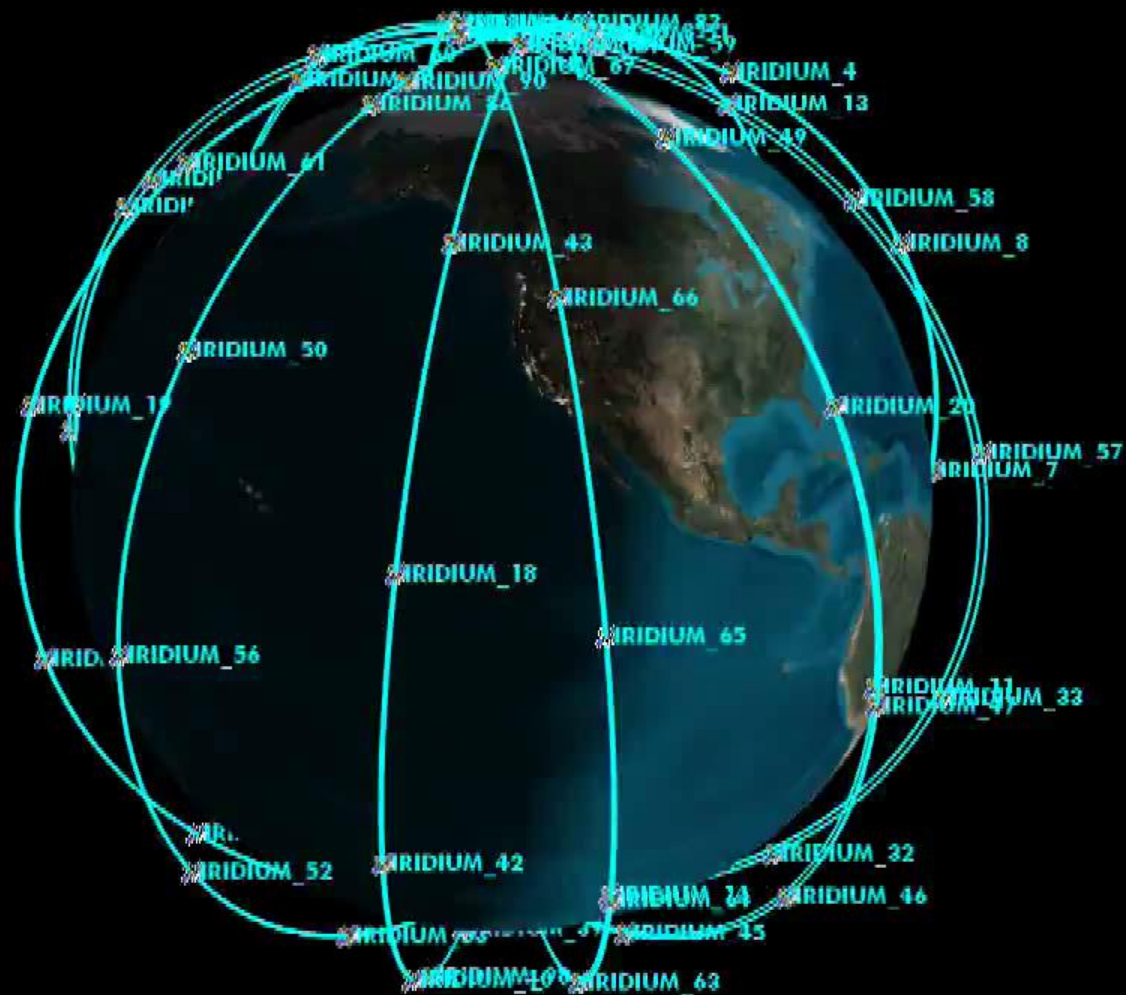
Segundo a NASA a Estação Espacial Internacional conduziu 29 manobras para evitar detritos desde 1999, incluindo três em 2020.

Em 15/10/2020, dois grandes pedaços de lixo espacial, o que restou do antigo satélite soviético e do propulsor de um foguete chinês, estavam em rota de colisão a 991 km de altitude.

Se tivessem colidido, teriam gerado uma nuvem de detritos que poderia atingir outros satélites.



<https://www.correiobraziliense.com.br/ciencia-e-saude/2020/10/4882649-a-quase-colisao-de-dois-pedacos-de-lixo-espacial-observada-por-radar.html>



OS PERIGOS DOS DETRITOS ESPACIAIS

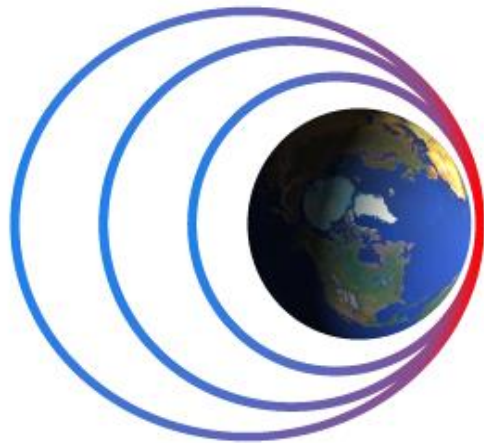
O satélite pode resistir ao calor da reentrada e atingir a superfície, contaminando o solo ou águas com material radioativo ou ainda causando danos a sociedade.

A hidrazina, uma substância altamente tóxica, utilizada como combustível em satélites.

Todos os dias, parte destes objetos e seus fragmentos passam pelo processo de reentrada, no qual eles atravessam as camadas mais densas da atmosfera terrestre e se queimam.



Representação da nave cargueira ATV-5 se rompendo durante a reentrada na atmosfera (Imagem: Reprodução/ESA-D. Ducros)



Decaimento orbital
devido ao arrasto
atmosférico

DETRITOS ESPACIAIS QUE REENTRARAM NA ATMOSFERA E NÃO FORAM COMPLETAMENTE INCINERADOS



Misteriosa bola de lixo espacial.
Queensland, Australia



Fragmento do Skylab com letreiro intacto



Lixo espacial na Sibéria



Parte externa de um motor de titânio,
Arábia Saudita



Tanque de propulsão de um dos veículos
de lançamento do Delta 2
Texas (EUA)

Cidade de Salinópolis, a 293 km de Belém (PA)-pedaço de fuselagem que caiu de um veículo espacial lançado da Guiana Francesa. Trata-se de pedaços do foguete Ariane 5 ECA, que levou ao espaço, em julho de 2013, o satélite Alphasat.



Pedaço de material que seria de fuselagem de foguete espacial foi encontrado em localidade do Pará (Foto: Tarso Sarraf/Estadão Conteúdo). 29/04/2014

<http://g1.globo.com/ciencia-e-saude/noticia/2014/04/peca-achada-no-para-pode-ser-de-foguete-que-decolou-da-guiana.html>

REENTRADA DE DETRITOS ESPACIAIS

A primeira estação espacial chinesa, chamada Tiangong-1, foi lançada em 2011.

http://www.satview.org/?sat_id=37820U&lang=br

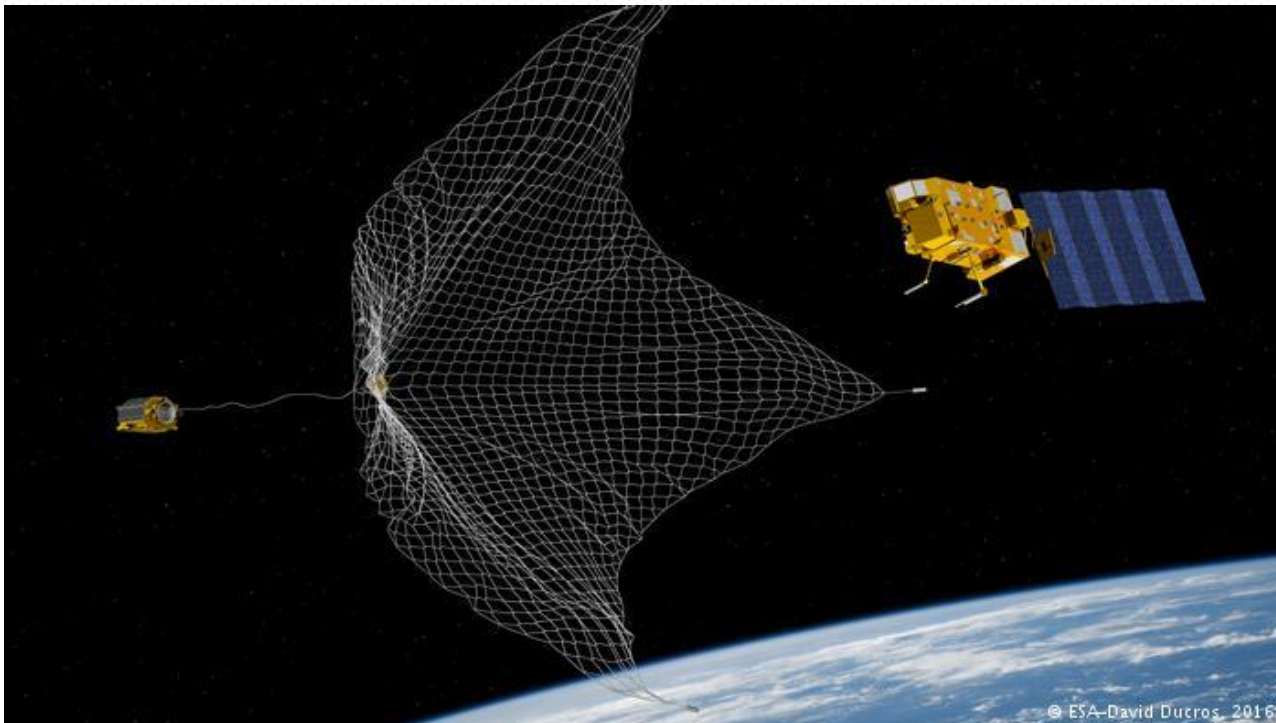
A Tiangong possuía 10 metros de comprimento e pesava oito toneladas.



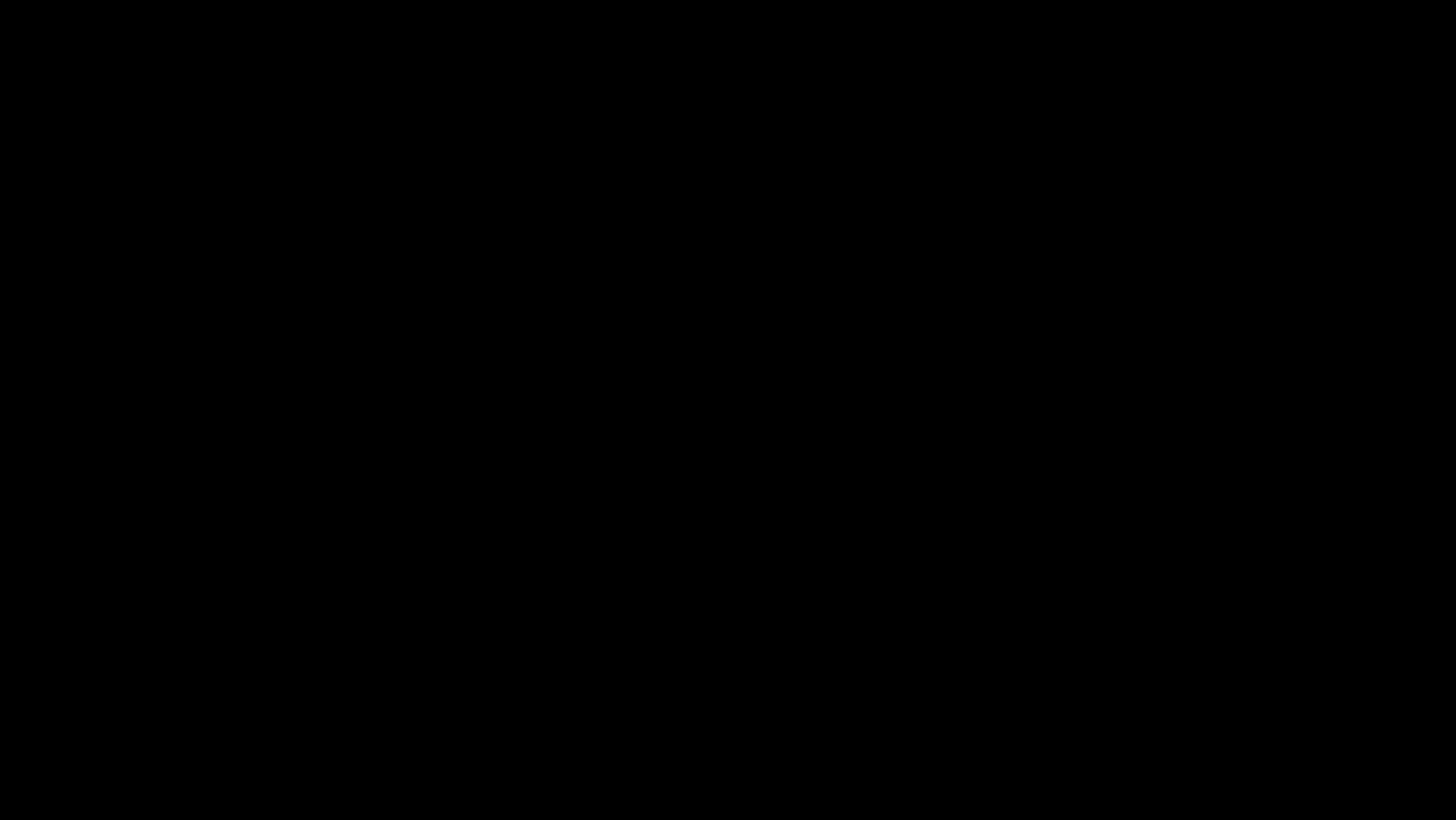
<http://revistagalileu.globo.com/Ciencia/noticia/2016/09/estacao-espacial-chinesa-esta-fora-de-controle-e-vai-cair-na-terra.html>

TECNOLOGIAS PARA MITIGAÇÃO DO LIXO ESPACIAL

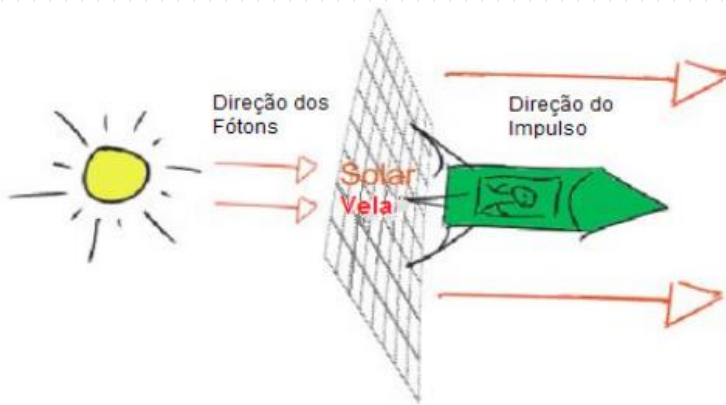
1- e.Deorbit que significa desorbitar.



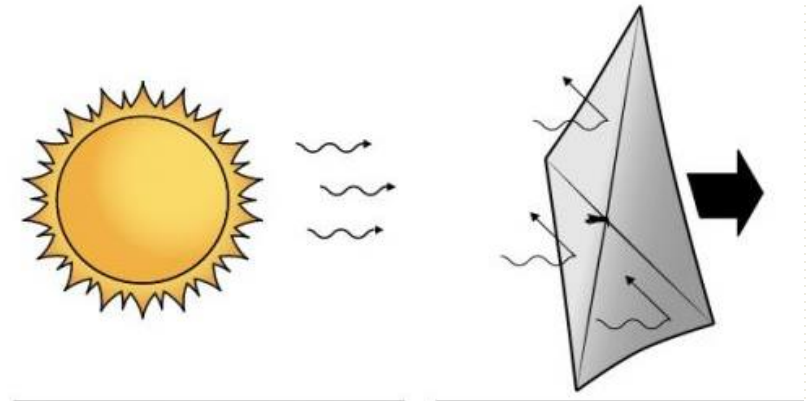
<http://www.dw.com/en/nets-n-lasers-some-of-our-best-hopes-for-mitigating-the-threat-of-space-debris/a-38340435>



2- Vela solar é um tipo de propulsão de naves espaciais que utiliza pressão de radiação solar para gerar aceleração.



**Exemplo de funcionamento
Vela Solar
Fonte: Google Imagens**



Fonte:
http://www.rtp.pt/noticias/ciencias/prototipo-do-lightsail-ou-velas-solares-colocado-em-orbita_n831802

3- “órbitas-cemitério”

Consiste em lugares bem distantes da atmosfera terrestre, onde o risco de colisões seria mitigado.

4- Antissatélite

O primeiro passo foi dado pela China, em 2007.

Em janeiro de 2008 um satélite norte-americano desgovernado teve de ser destruído por um míssil, pois havia a possibilidade de cair em área habitada.

Em 15/11/21 o teste de dispositivo antissatélite realizado pela Rússia, que explodiu o Kosmos-1408, satélite russo (desativado) lançado em 1982.

ASAT TEST
Xichang Space Center, China
January 11, 2007

Visualization using the data tracks
available on January 29, 2007

5- Cabo Magnético

O equipamento japonês consiste numa espécie de cabo encapado com aço inoxidável e alumínio, que deverá atar o cabo a um dos milhares de destroços que flutuam na órbita terrestre e atraí-lo magneticamente à atmosfera.

6- Raios Lazer

Na Austrália, uma empresa apresentou um projeto que se utiliza de raios laser para destruir o lixo espacial.

7- Satélite Gari

Na Suíça, engenheiros também apresentaram um projeto denominado CleanSpace One, uma espécie de satélite-gari, minúsculo, que tem como objetivo se aproximar de satélites que estejam desativados, capturar os detritos e forçar sua reentrada na atmosfera terrestre, de modo à incinerá-los.

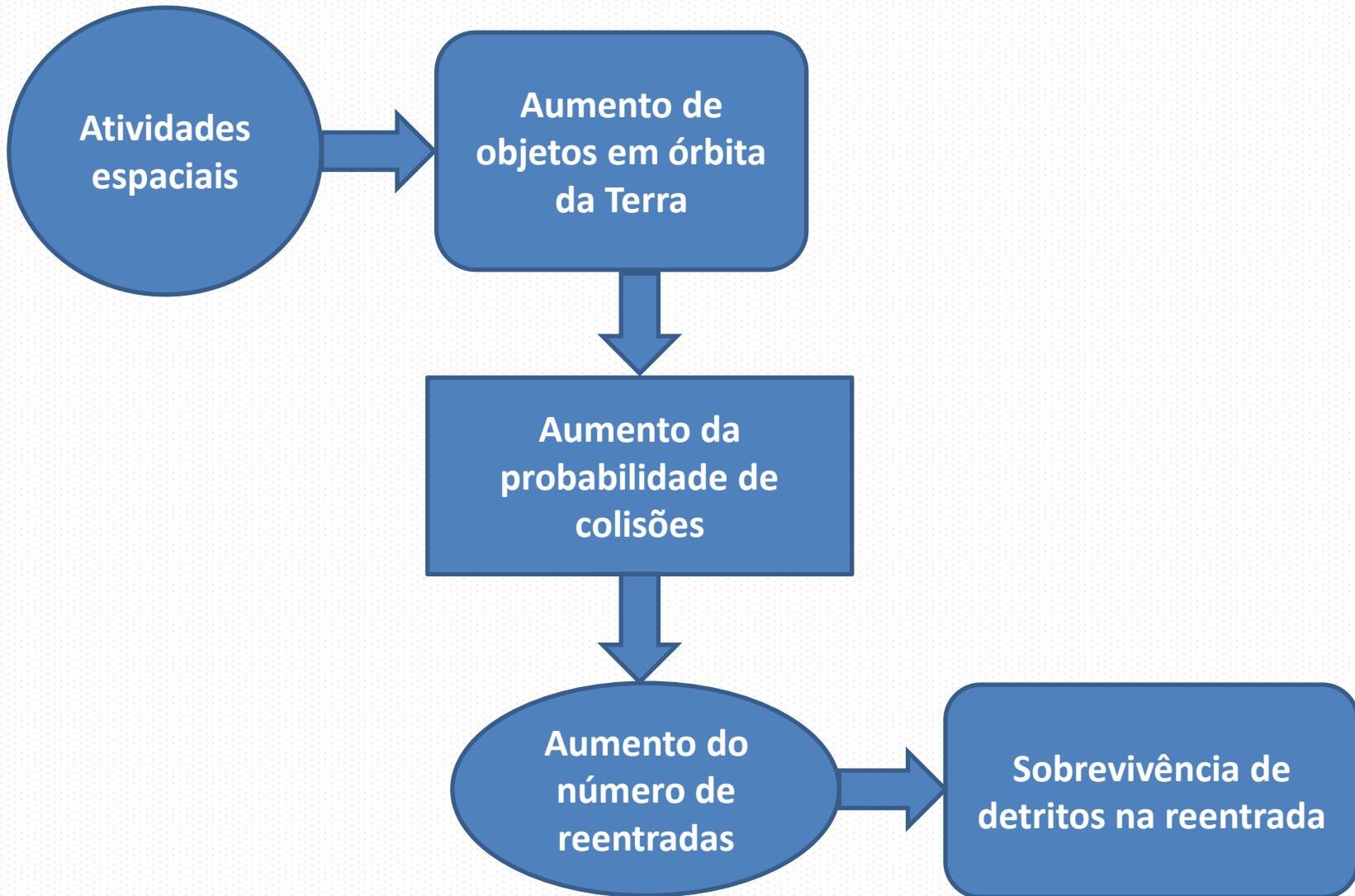
8- Braços robóticos

Seriam lançados pequenos satélites equipados com braços robóticos. Um destes braços teria como finalidade captar um fragmento e segurá-lo, o outro, por sua vez, fixaria um motor propulsor, que levaria o pedaço de lixo para além da órbita terrestre.

9- Aerogel

A ideia de se utilizar um aerogel leve e adesivo para a coleta de lixo espacial também foi proposta.

O PROBLEMA DOS DETRITOS ESPACIAIS



Detritos espaciais - Perigo



Source : CNN (2021)

O PROBLEMA DO LIXO ESPACIAL

Quantos objetos de lixo espacial estão atualmente em órbita da Terra?

LIXO ESPACIAL EM NÚMEROS

~34.000 objetos > 10 cm

~ 900.000 objetos 1-10 cm

~ 128 milhões objetos 1 mm-1cm.

Uma colisão com um:

objeto de 10 cm implicaria em uma fragmentação catastrófica de um satélite típico.

objeto de 1 cm desativaria uma espaçonave e penetraria nos escudos da ISS.

objeto de 1 mm pode destruir subsistemas a bordo de uma nave espacial.

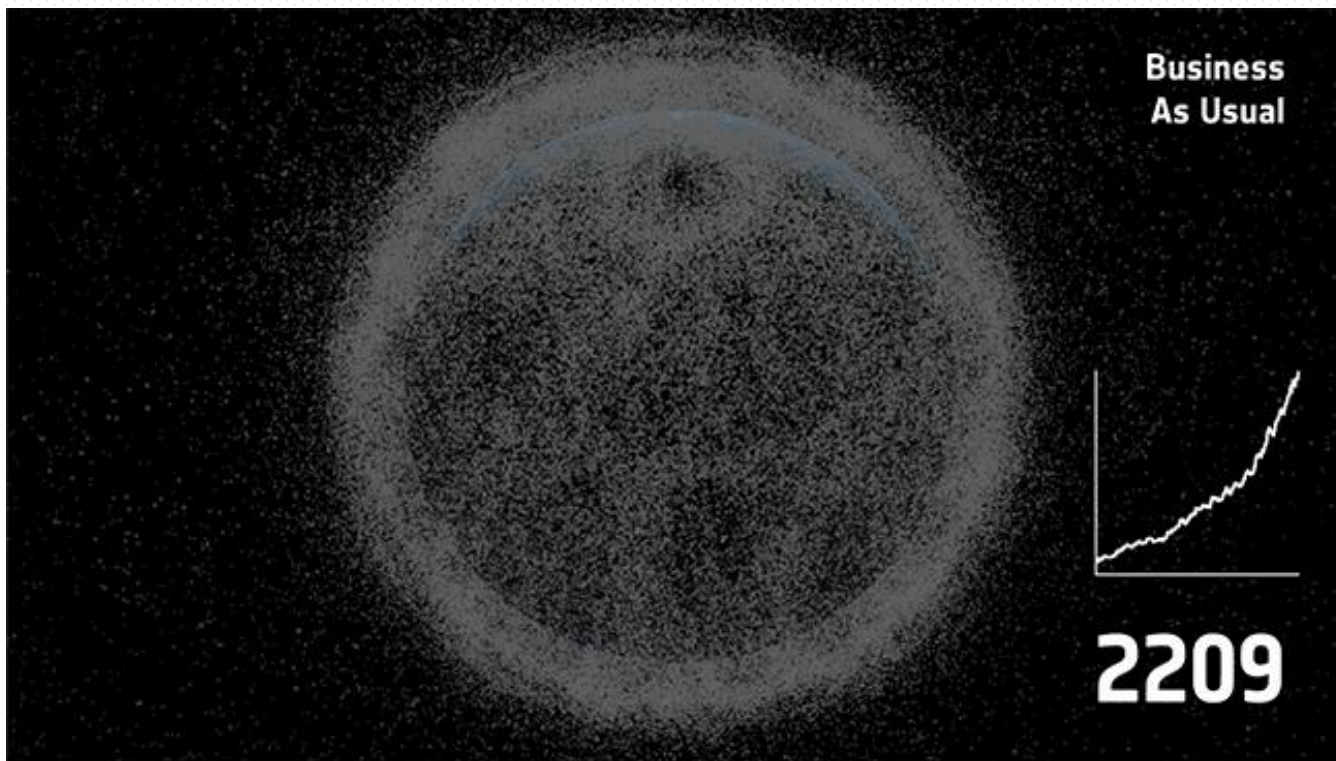
Fonte: ESA

https://www.esa.int/Safety_Security/Clean_Space/How_many_space_debris_objects_are_currently_in_orbit

- **ALARMANTE:**

Apenas cerca de 6% do número total de objetos no espaço são funcionais (ESA, 2019).

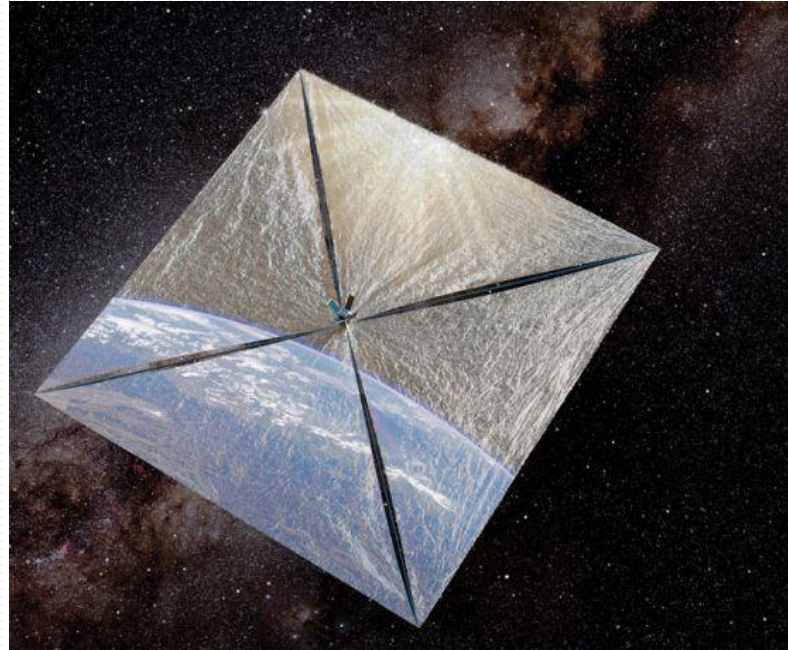
Podemos ser sustentáveis no espaço?



Fonte: ESA (2008)

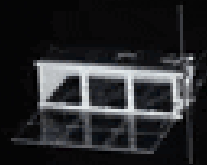
PROPOSTA DE MITIGAÇÃO DO LIXO ESPACIAL

❖ Vela solar



http://www.apolo11.com/spacenews.php?titulo=Experimental_Vela_solar_em_forma_de_pipa_ja_esta_no_espaco!&posic=dat_20150522-114855.inc

A ideia de usar uma vela solar é tirar proveito da energia da PRS; desta forma, a vela experimenta uma pequena aceleração, mas ilimitada e contínua.



https://www.esa.int/Safety_Security/Space_Debris

MODELO MATEMÁTICO

A equação de movimento do detrito espacial é dada por

$$\ddot{\mathbf{r}} = \ddot{\mathbf{r}}_{J2} + \ddot{\mathbf{r}}_L + \ddot{\mathbf{r}}_S + \ddot{\mathbf{r}}_{PRS}$$

Modelo da Pressão de Radiação Solar (PRS)

A aceleração exercida em um corpo perfeitamente reflexivo pela pressão de radiação solar, expressa no referencial inercial Oxyz centrado no corpo central, é dado por Tresaco et al. (2016, 2018)

$$\ddot{\mathbf{r}}_{\text{SRP}} = \beta \mu_{\odot} \frac{\mathbf{r} - \mathbf{r}_{\odot}}{\|\mathbf{r} - \mathbf{r}_{\odot}\|^3}$$

$P = I/c$, where I is the Solar flux

$$I = I_0 \left(\frac{1}{\rho} \right)^2,$$

$$\sigma^* = 2P/\mu_{\odot} \text{ (McInnes 1999)}$$

$$\sigma^* = 1.53(1/\rho)^2$$

$$\sigma = \frac{m}{A} \text{ and } \beta = \frac{\sigma^*}{\sigma} \text{ (McInnes 1999).}$$

MODELO DA PRESSÃO DE RADIAÇÃO SOLAR (PRS)

Assim, em Tresaco, Elipe e Carvalho (2016) definimos a PRS da forma

$$\ddot{\mathbf{r}}_{\text{SRP}} = \beta\mu_{\odot} \frac{\mathbf{r} - \mathbf{r}_{\odot}}{\|\mathbf{r} - \mathbf{r}_{\odot}\|^3}$$

a aceleração da vela devido à pressão de radiação pode ser expressa como o gradiente do seguinte potencial:

$$U_{\text{SRP}} = -\beta\mu_{\odot} \left(\frac{1}{\|\mathbf{r} - \mathbf{r}_{\odot}\|} \right)$$

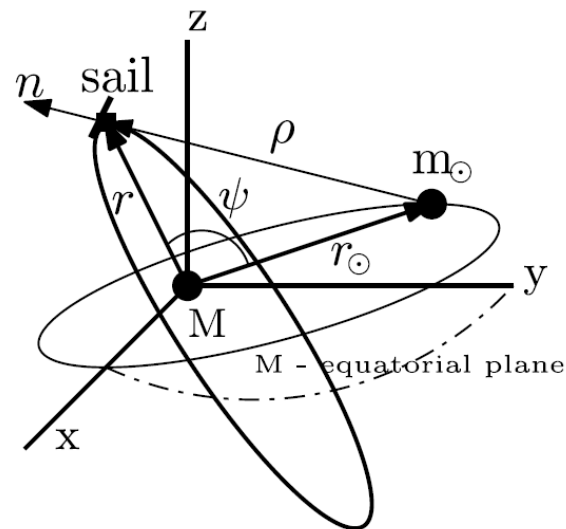


Fig. 1 Scheme of the dynamical system.

Expandindo em termos de polinômios de Legendre até a segunda ordem, temos

$$U_{\text{SRP}} = -\beta \frac{\mu_{\odot}}{r_{\odot}} \left[1 + \frac{r}{r_{\odot}} \cos \psi + \frac{1}{2} \left(\frac{r}{r_{\odot}} \right)^2 (3 \cos^2 \psi - 1) \right] \quad (16)$$

Modelo de Média Simples (Carvalho et al. submetido 2021):

$$\begin{aligned}
 \langle R_{SRP} \rangle = & \frac{81}{27} \beta \frac{e a n_{\odot}^2 a_{\odot}}{(1-e_{\odot}^2)^2} \left(-\frac{1}{27} (20 \cos(i) - 20) (\cos(i_{\odot}) - 1) (e_{\odot}^2 - 2/5) \times \right. \\
 & \cos(-l_{\odot} + g - h - g_{\odot} + h_{\odot}) - \frac{1}{27} (20 e_{\odot}^2 - 8) (\cos(i) + 1) \times \\
 & (1 + \cos(i_{\odot})) \cos(-l_{\odot} + g + h - g_{\odot} - h_{\odot}) + e_{\odot}^2 \times \\
 & (\cos(i_{\odot}) - 1) (\cos(i) - 1) \cos(-3l_{\odot} + g - h - g_{\odot} + h_{\odot}) + \\
 & e_{\odot}^2 (\cos(i) + 1) (1 + \cos(i_{\odot})) \cos(-3l_{\odot} + g + h - g_{\odot} - h_{\odot}) + \\
 & \frac{16}{27} e_{\odot} (\cos(i_{\odot}) - 1) (\cos(i) - 1) \cos(-2l_{\odot} + g - h - g_{\odot} + h_{\odot}) + \\
 & \frac{16}{27} e_{\odot} (\cos(i) + 1) (1 + \cos(i_{\odot})) \cos(-2l_{\odot} + g + h - g_{\odot} - h_{\odot}) - \\
 & \frac{1}{27} e_{\odot}^2 (1 + \cos(i_{\odot})) (\cos(i) - 1) \cos(-l_{\odot} + g - h + g_{\odot} + h_{\odot}) - \\
 & \frac{1}{27} e_{\odot}^2 (\cos(i_{\odot}) - 1) (\cos(i) + 1) \cos(-l_{\odot} + g_{\odot} - h_{\odot} + g + h) + \\
 & \frac{1}{27} e_{\odot}^2 (\cos(i_{\odot}) - 1) (\cos(i) - 1) \cos(l_{\odot} + g - h - g_{\odot} + h_{\odot}) + \\
 & \frac{1}{27} e_{\odot}^2 (\cos(i) + 1) (1 + \cos(i_{\odot})) \cos(l_{\odot} + g + h - g_{\odot} - h_{\odot}) - \\
 & \frac{16}{27} e_{\odot} (1 + \cos(i_{\odot})) (\cos(i) - 1) \cos(2l_{\odot} + g - h + g_{\odot} + h_{\odot}) - \\
 & \left. \frac{16}{27} e_{\odot} (\cos(i_{\odot}) - 1) (\cos(i) + 1) \cos(2l_{\odot} + g_{\odot} - h_{\odot} + g + h) - \right.
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& e_{\odot}^2(1 + \cos(i_{\odot}))(\cos(i) - 1) \cos(3l_{\odot} + g - h + g_{\odot} + h_{\odot}) - \\
& e_{\odot}^2(\cos(i_{\odot}) - 1)(\cos(i) + 1) \cos(3l_{\odot} + g_{\odot} - h_{\odot} + g + h) + \\
& \frac{1}{27}(20 \cos(i) - 20)(e_{\odot}^2 - 2/5)(1 + \cos(i_{\odot})) \cos(l_{\odot} + g - h + g_{\odot} + h_{\odot}) + \\
& \frac{1}{27}(20 \cos(i_{\odot}) - 20)(e_{\odot}^2 - 2/5)(\cos(i) + 1) \cos(l_{\odot} + g_{\odot} - h_{\odot} + g + h) + \\
& 2\left(-\frac{20e_{\odot}^2}{27} + \frac{8}{27}\right) \cos(-l_{\odot} - g_{\odot} + g) + \cos(-3l_{\odot} - g_{\odot} + g)e_{\odot}^2 + \\
& \frac{16}{27} \cos(-2l_{\odot} - g_{\odot} + g)e_{\odot} - 1/27e_{\odot}^2 \cos(-l_{\odot} + g_{\odot} + g) + \\
& \frac{1}{27}e_{\odot}^2 \cos(l_{\odot} - g_{\odot} + g) - \frac{16}{27}e_{\odot} \cos(2l_{\odot} + g_{\odot} + g) - \\
& e_{\odot}^2 \cos(3l_{\odot} + g_{\odot} + g) + \cos(l_{\odot} + g_{\odot} + g)\left(\frac{20e_{\odot}^2}{27} - \frac{8}{27}\right) \sin(i) \sin(i_{\odot})
\end{aligned} \tag{22}$$

here n_{\odot} is the mean motion of the disturbing body.

EQUAÇÕES PLANETÁRIAS DE LAGRANGE

$$\frac{da}{dt} = \frac{2}{na} \frac{\partial R}{\partial M},$$

$$\frac{de}{dt} = \frac{-\sqrt{1-e^2}}{na^2e} \frac{\partial R}{\partial \omega} + \frac{1-e^2}{na^2e} \frac{\partial R}{\partial M}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{-1}{na^2\sqrt{1-e^2}\operatorname{sen}i} \frac{\partial R}{\partial \Omega} + \frac{\operatorname{cos}i}{na^2\sqrt{1-e^2}\operatorname{sen}i} \frac{\partial R}{\partial \omega},$$

$$\frac{d\Omega}{dt} = \frac{1}{na^2\sqrt{1-e^2}\operatorname{sen}i} \frac{\partial R}{\partial i},$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{\sqrt{1-e^2}}{na^2e} \frac{\partial R}{\partial e} - \frac{\operatorname{cos}i}{na^2\sqrt{1-e^2}\operatorname{sen}i} \frac{\partial R}{\partial i},$$

$$\frac{dM}{dt} = n - \frac{2}{na} \frac{\partial R}{\partial a} - \frac{1-e^2}{na^2e} \frac{\partial R}{\partial e},$$

Aplicações:

Considerando no potencial perturbador a perturbação do Sol, da Lua, o achatamento da Terra (J2) e a PRS. O potencial é posto na forma

$$R = \langle R_{J_2} \rangle + \langle R_{2L} \rangle + \langle R_{2S} \rangle + \langle R_{PRS} \rangle$$

O potencial é substituído nas equações planetárias de Lagrange e integrado numericamente usando o software Maple.

A ideia é usar a vela solar para amplificar o crescimento da excentricidade e a inclinação dos detritos numa órbita geoestacionária.

UM TÍPICO SATÉLITE ARTIFICIAL EM ÓRBITA GEO

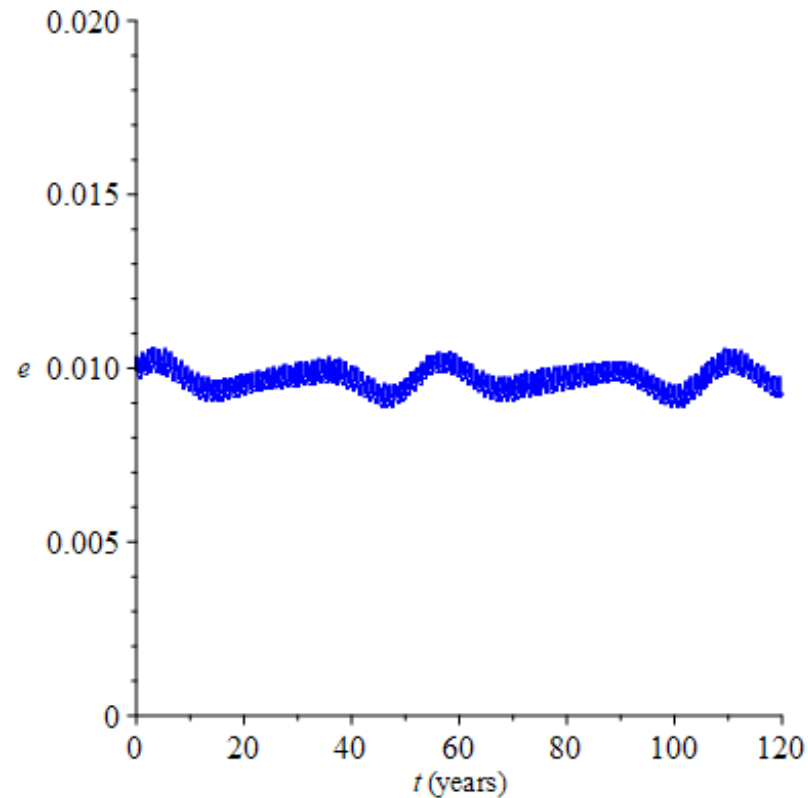


Fig. 1- $A/m=0,012 \text{ m}^2/\text{kg}$. Carvalho et al.
(submetido 2021)

Aplicação - Objeto: E06321D (debris)

Dados das Simulações: <http://stuffin.space/>

$a = 41400$ km $g=0$; $h=0$

$e = 0,035$

$i = 7^\circ$

A/m em m^2/kg

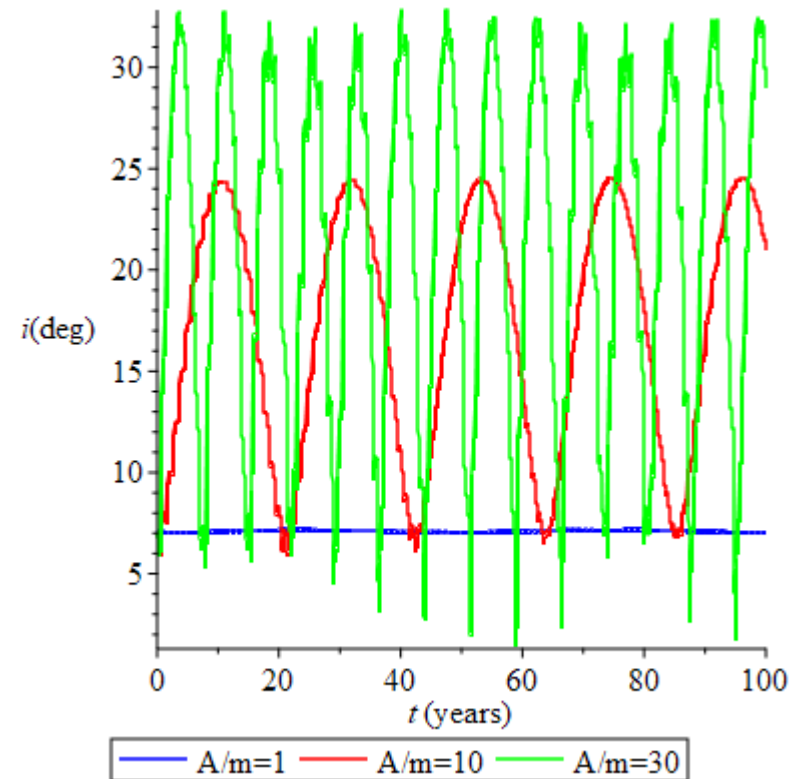
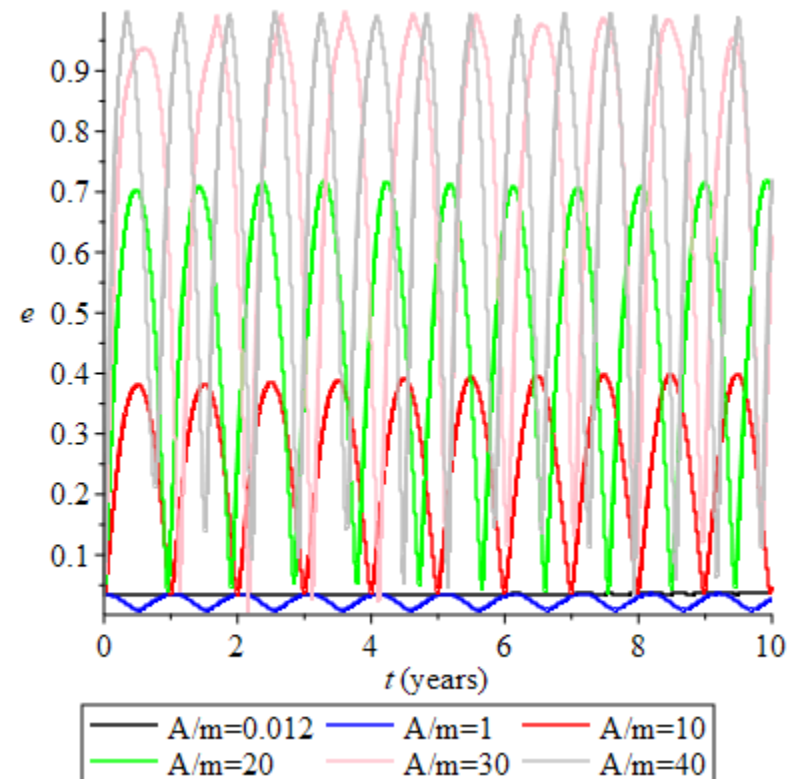


Fig. 2- Carvalho et al. (Submetido 2021)

Fig. 3- Carvalho et al. (Submetido 2021)

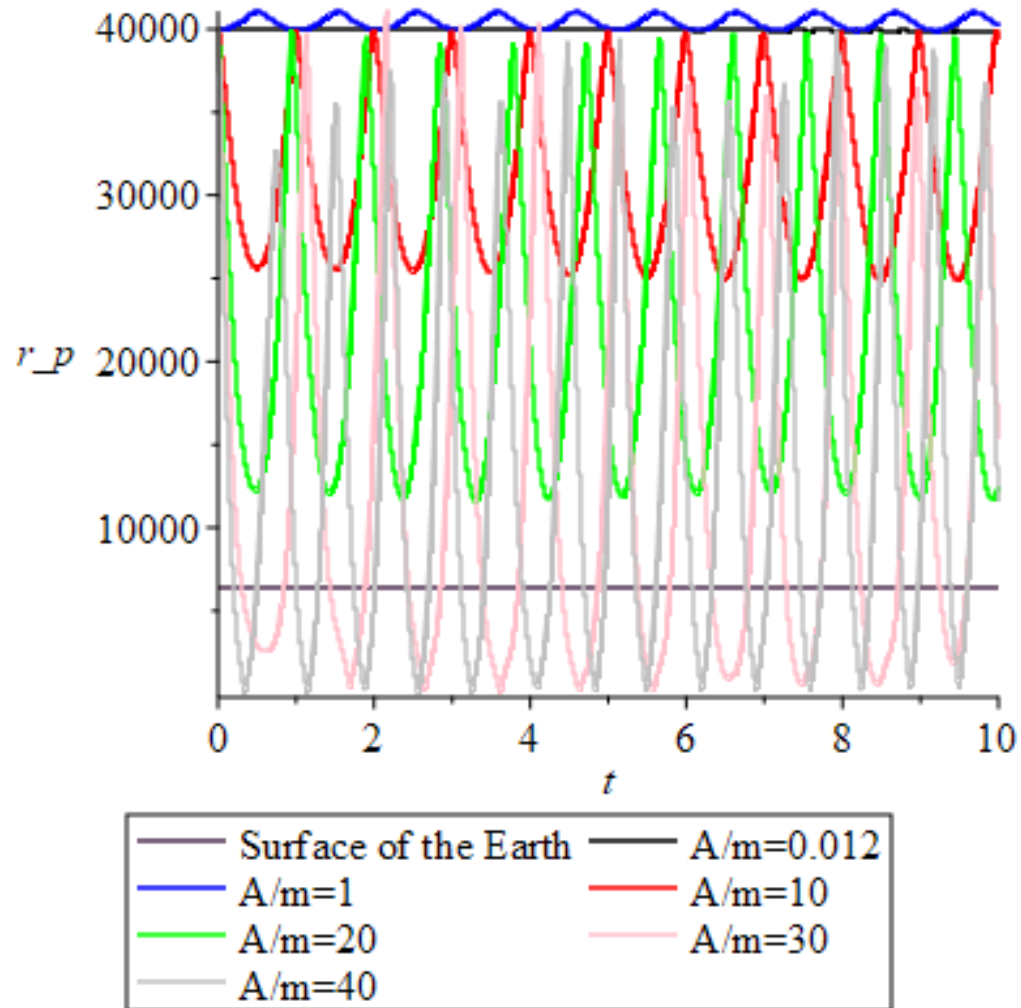


Fig. 4- Carvalho et al. (submetido 2021)

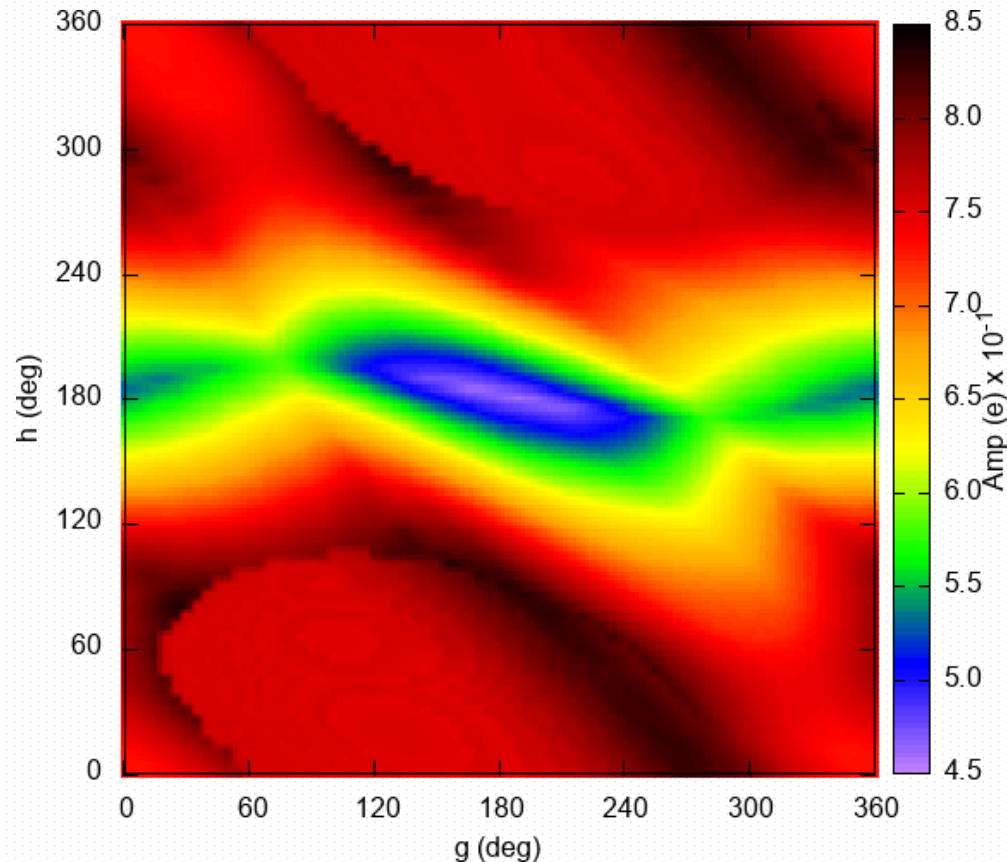
Aplicação - Objeto: E06321D (debris)

Dados das Simulações: <http://stuffin.space/>

$a = 41695$ km,

$A/m = 25$ m²/kg

$e = 0,08318$,



Detrito MSG 1 DEB (BAFFLE COVER)

Por fim, verificamos que a vela solar é uma tecnologia importante que pode ser utilizada para remoção do lixo espacial, usando uma fonte de energia limpa e abundante.

A destruição de satélites individuais ou a perda permanente de órbitas específicas devido ao crescimento descontrolado de detritos teria um efeito devastador nas atividades econômicas no espaço, afetando gravemente a economia global.

Um simples pedaço de lixo espacial com cerca de 1 cm de diâmetro pode causar um impacto equivalente ao de uma bola de boliche se movendo a 400 km/h. Portanto, é importante uma atenção especial a estes objetos e suas trajetórias.

DIVULGAÇÃO:

LIMA, JACKSON DOS SANTOS. Uso da vela solar e das perturbações orbitais naturais para remoção de detritos espaciais, 2019. 60 páginas. Monografia - Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Feira de Santana, 2019.

GONÇALVES, CARINE MOREIRA. Detrito espacial: causas e consequências no ambiente espacial e terrestre, 2021. 69 páginas. Monografia - Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Feira de Santana, 2021.

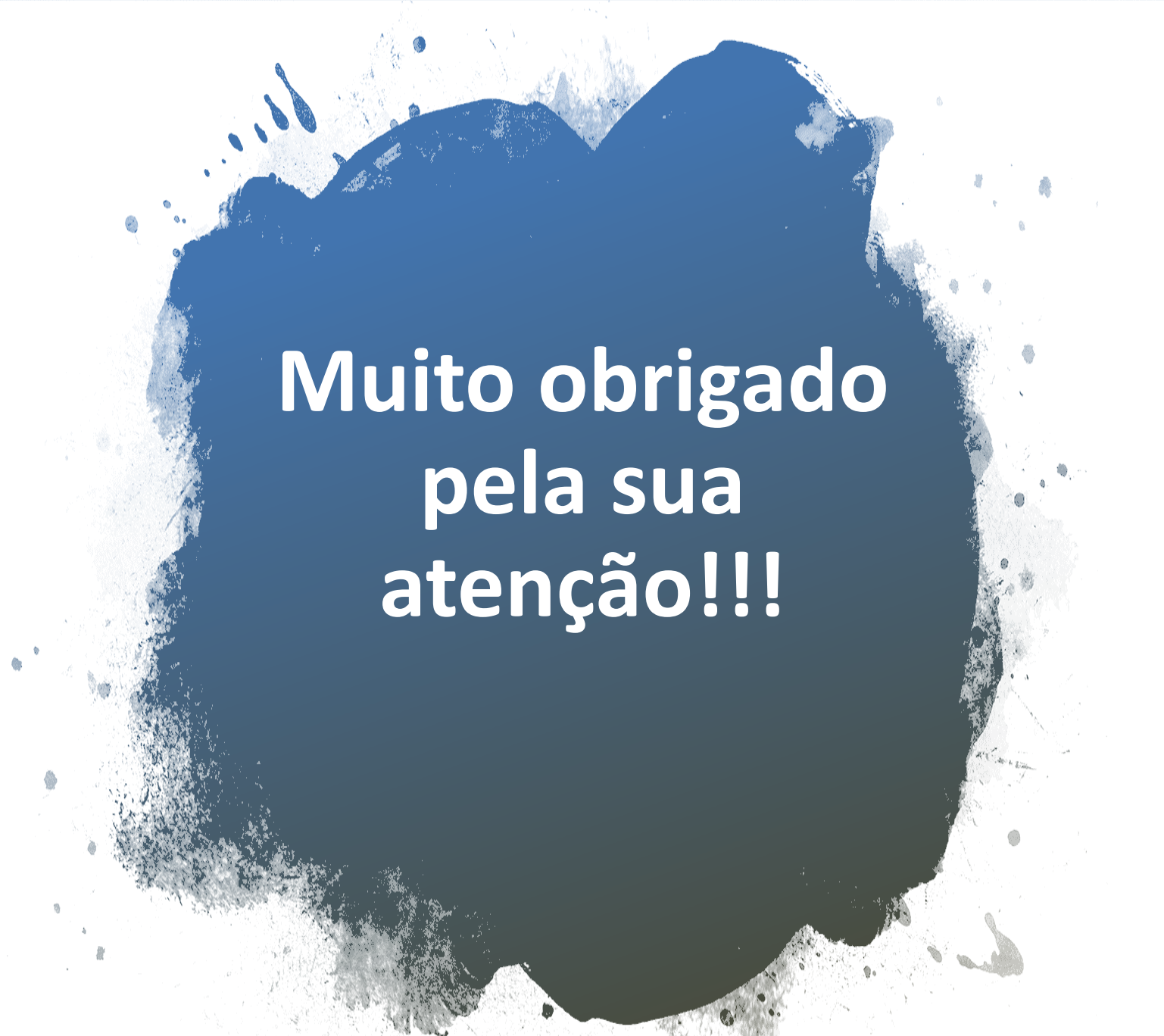
REFERÊNCIAS

- 1- Casanova, D., Petit, A., Lemaître, A. Long-term evolution of space debris under the J2 effect, the solar radiation pressure and the solar and lunar perturbations. **Celest. Mech. Dyn. Astr**, Vol. 123, n. 2, p. 223–238, 2015.
- 2- Tresaco, E. Elipe, A., **Carvalho, J. P. S.** Frozen orbits for a solar sail around Mercury. **Journal of Guidance, Control, and Dynamics**, Vol. 39, No. 7, 1659-1666, 2016.
- 3- Gkolias, I., Colombo, C. Towards a sustainable exploitation of the geosynchronous orbital region. **Celest Mech Dyn Astr Vol.** 131, 19, 2019.
- 4- **Carvalho, J. P. S.** Proceeding Series of the **Brazilian Society of Applied and Computational Mathematics**, Vol. 4, N. 1, 2016. DOI: 10.5540/03.2016.004.01.0017

5- Tresaco, E., **Carvalho, J. P. S.** Elife, A. Prado, A. F. B. A., Vilhena de Moraes, R. Averaged model to study long-term dynamics of a probe about Mercury. **Celest. Mech. Dyn. Astron.** Vol. 130, 9, 2018.

6- McInnes, C. R. **Solar Sailing: Technology, Dynamics and Mission Applications**, Springer-Praxis Series in Space Science and Technology, Springer-Verlag, 1999.

7- Yokoyama, T. Possible effects of secular resonances in Phobos and Triton. **Planetary and Space Science** Vol. 50, 63, 2002.



**Muito obrigado
pela sua
atenção!!!**

O Space-Track, rede americana de monitoramento espacial

<http://stuffin.space/>

Link dos vídeos apresentados:

<https://www.youtube.com/watch?v=NkRdR0MHpIU>

<https://www.youtube.com/watch?v=bs0jryyK5fI>

<https://www.youtube.com/watch?v=-JRAPo1SZe8>

<https://www.youtube.com/watch?v=A374MM8imvQ>