

## **Análise do Torque de Pressão de Radiação Solar e do Torque Aerodinâmico com Dados Simulados do Satélite CBERS**

G. A. X. RIBEIRO<sup>1\*</sup>, B. G. CORDEIRO<sup>2</sup>, R. V. GARCIA<sup>3</sup> e H. K. KUGA<sup>4</sup>

Recebido em 17 de dezembro de 2021 / Aceito em 13 de dezembro de 2022

**RESUMO.** O crescimento do número de lançamentos de satélites artificiais para as mais diferentes funções tem motivado estudos relacionados a atividades de controle, propagação e determinação de órbita e atitude. Neste trabalho é feito um estudo do Torque de Pressão de Radiação Solar (TPRS) e do Torque Aerodinâmico (TA) do satélite CBERS (*China-Brazil Earth Resources Satellite*) quando são considerados os modelos utilizados na missão do satélite. Os resultados mostraram que para satélites em órbitas baixas terrestres (*Low Earth Orbit-LEO*), como no caso do CBERS, o TA tem efeitos mais relevantes na superfície do satélite do que o TPRS. Estes resultados poderão ser úteis para a supervisão e controle do satélite no pós-lançamento, sendo vital para o controle de atitude e da órbita do satélite CBERS.

**Palavras-chave:** torque de pressão de radiação solar, torque aerodinâmico, satélite CBERS.

### **1 INTRODUÇÃO**

Atualmente vem sendo observado um maior crescimento de lançamentos de veículos espaciais para diversas finalidade. Tais veículos possuem sofisticados sistemas de controle que permitem uma análise precisa de sua órbita e atitude. Nesse contexto, a análise dos torques externos que atuam em um satélite é de suma importância para uma missão espacial de sucesso. De acordo com a órbita do satélite e as características do formato do satélite, três principais torques de perturbação externa podem ser considerados: o torque aerodinâmico, o torque de pressão de radiação solar e o torque de magnético residual. Apesar de apresentarem diferentes ordens de

---

\*Autor correspondente: Geovani Augusto Xavier Ribeiro – E-mail: geovani.augusto@usp.br

<sup>1</sup>Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Estrada Municipal do Campinho, s/n., 12602-810, Lorena, SP, Brasil – E-mail: geovani.augusto@usp.br <https://orcid.org/0000-0002-6195-564X>

<sup>2</sup>Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Estrada Municipal do Campinho, s/n., 12602-810, Lorena, SP, Brasil – E-mail: bru020@usp.br <https://orcid.org/0000-0003-2733-2075>

<sup>3</sup>Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Estrada Municipal do Campinho, s/n., 12602-810, Lorena, SP, Brasil – E-mail: robertagarcia@usp.br <https://orcid.org/0000-0002-0633-6272>

<sup>4</sup>Divisão de Mecânica e Controle, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Avenida dos Astronautas, 1758, Jardim da Graja, 12227-010, São José dos Campos, SP, Brasil – E-mail: helio.kuga@inpe.br <https://orcid.org/0000-0002-0259-0724>

magnitude, todos os torques ambientais atuantes sobre o satélite devem ser previstos e calculados para que o mesmo não sofra com alterações indesejadas nos seus movimentos orbital e translacional [17].

O programa de satélites CBERS (*China-Brazil Earth Resources Satellite* – Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres) é uma parceria firmada em 1988 entre Brasil e a China para construção de satélites de sensoriamento remoto. A união de dois centros de alto desenvolvimento técnico-científico culminou na criação de 6 satélites, sendo o CBERS-4A o último lançado e que contou com a colaboração de 50% para cada país de recursos, assim como a divisão de responsabilidades no fornecimento dos subsistemas e equipamentos. O satélite CBERS-4A foi lançado em 20 de dezembro de 2019 e, atualmente, fornece dados para os governos chinês e brasileiro.

Os satélites CBERS possuem algumas especificidades orbitais, por exemplo, uma órbita sol-síncrona, recorrente e congelada. A sol-sincronicidade garante que o satélite tenha uma iluminação contínua para que as câmeras consigam captar e mapear regiões de uma maneira mais efetiva e, devido a sua quase circularidade (excentricidade baixa), garante a recorrência do satélite, ou seja, o corpo ultrapassa a linha do Equador sempre em um determinado horário específico, a saber às 10:30, o que garante um ótimo índice de irradiância solar. Ademais, os ciclos deste satélite são fixos em 31 dias, o que permite que ele faça a cobertura de todo o globo terrestre, com exceção dos polos [5, 8]. A Figura 1 ilustra os equipamentos internos do satélite CBERS-4A.

Neste artigo, para simular o movimento orbital do satélite CBERS e obter parâmetros orbitais, foi utilizado um pacote de rotinas que simula órbita e atitude de satélites em MATLAB, denominado PROPAT [3]. Tais informações da órbita do satélite foram utilizadas para calcular os torques aerodinâmico e de pressão de radiação solar. Dentre as informações utilizadas, destacam-se os chamados elementos orbitais, parâmetros importantes para a órbita e a localização do satélite no espaço. A Figura 2 ilustra tais elementos, sendo que  $a$  é o semieixo maior,  $f$  é a anomalia verdadeira,  $\omega$  é o argumento do perigeu,  $\Omega$  é a longitude do nodo ascendente,  $I$  é a inclinação e  $e$  é a excentricidade da órbita.

O Torque de Pressão de Radiação Solar (TPRS) é causado pela interação entre a energia radiante do fluxo de fótons e a superfície do satélite [12, 16]. No presente trabalho, para a análise do TPRS, não foram considerados os períodos em que o satélite encontrava-se na sombra da Terra e o albedo terrestre e lunar.

Por sua vez, o Torque Aerodinâmico (TA) é originado através do impacto das moléculas de ar existentes no espaço com o corpo do satélite. Cada um desses impactos geram forças aerodinâmicas vetoriais que, somadas, originam uma magnitude total do TA que causa uma tendência de rotação do satélite. De acordo com [11], em satélites de baixas altitudes, ou seja, com altitude abaixo de 1.000 km, o torque predominante é o aerodinâmico, enquanto o torque de pressão de radiação solar tem maior interferência em satélites de altas altitudes que segundo [9] são satélites que possuem altitude superior a 35.786 km. Tal fato ocorre pois, quanto menor a altitude do

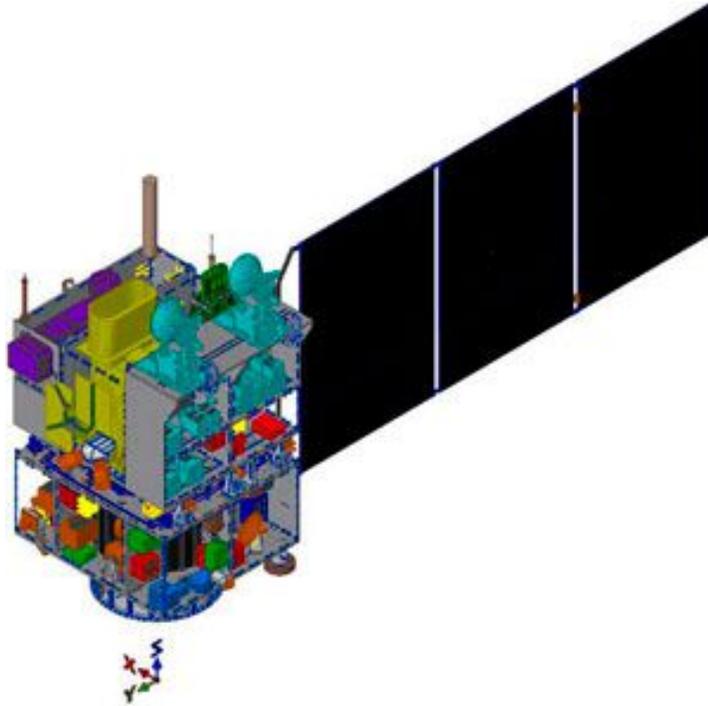


Figura 1: Esboço dos equipamentos internos do satélite CBERS-4A. Retirado de [4].

satélite, mais próximo o mesmo se encontra da atmosfera terrestre aonde existe uma maior quantidade de moléculas de ar. Dessa forma, maior é a probabilidade de colisões entre as moléculas da atmosfera com o corpo do satélite [15].

A análise da magnitude dos torques TA e TPRS é feita considerando o modelo “customizado” para o satélite CBERS [10]. O termo “customizado” será utilizado fazendo referência ao modelo real do satélite, obtido por meio de aproximações e considerações realizadas pelos responsáveis do projeto CBERS.

## 2 TORQUES

Os torques são causados por forças internas e externas que agem sobre a superfície do satélite. Tais perturbações podem afetar a orientação nominal do satélite e, por isso, conhecê-las é fundamental para que se possa manter a orientação do corpo dentro dos limites aceitáveis da missão.

Considerando as forças externas ao satélite que causam os chamados torques ambientais, de maneira geral, podemos classificá-los por: Torque de Gradiente de Gravidade, Torque de Pressão de Radiação Solar Direta, Torque Aerodinâmico e o Torque Magnético [13]. Neste estudo, serão considerados os torques de pressão de radiação solar e aerodinâmico.

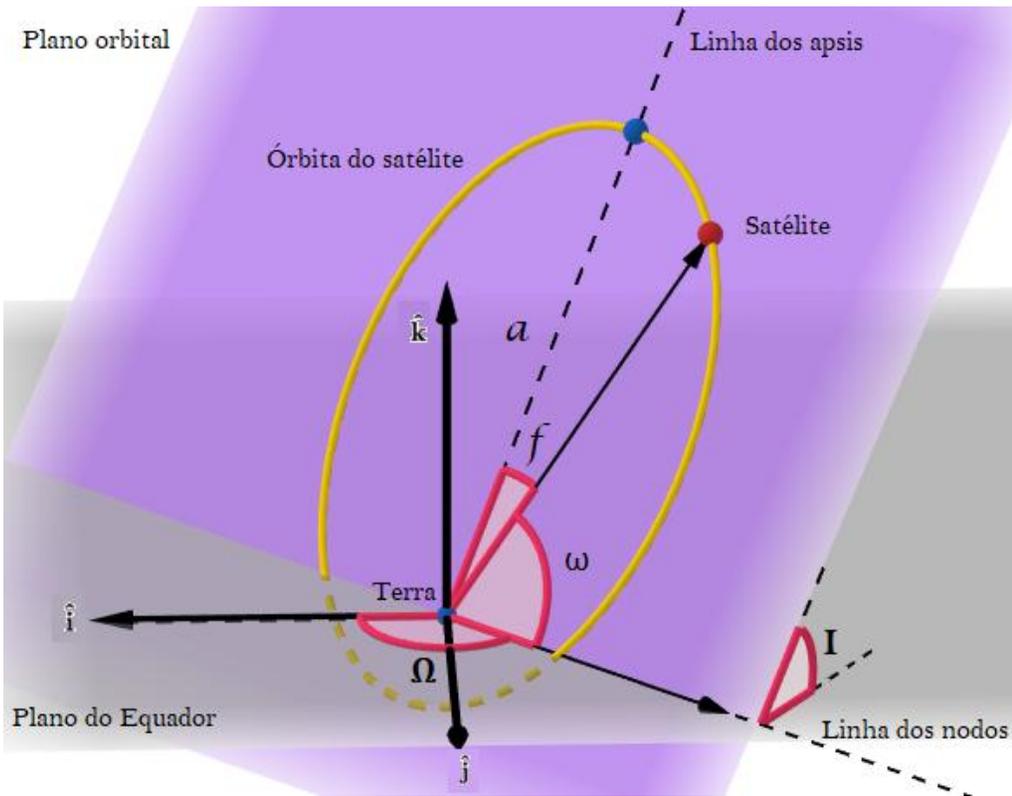


Figura 2: Representação dos elementos orbitais. Retirado de [7].

## 2.1 Torque de Pressão de Radiação Solar

Existem diferentes tipos de torque de pressão de radiação [16]. A pressão de radiação pode ser causada pela Terra, através da emissão de radiação do infra-vermelho que segue a Lei de Stefan-Boltzmann e também através da reflexão de fótons que colidem na Terra (ou na Lua) e posteriormente colidem na superfície do satélite. Neste artigo é considerada apenas a pressão de radiação solar direta, ou seja, quando os fótons oriundos do Sol colidem diretamente na superfície do satélite. Os fótons incidentes na superfície do satélite possuem uma energia, que é conhecida como energia radiante, que está sujeita às variações do espalhamento da atmosfera terrestre. Além disso, na superfície do satélite, o fluxo de fótons é parcialmente refletido (difusamente ou especularmente) com uma parcela  $\gamma$  e uma outra parte  $(1 - \gamma)$  é absorvida e depois irradiada novamente. O ângulo de incidência na superfície do satélite é calculado através do versor normal e do versor do Sol, assim a parcela total de reflexão dos fótons refletidos especularmente é  $\beta\gamma$ . Os parâmetros  $\beta$  e  $\gamma$  significam, respectivamente, o coeficiente de reflexão especular e o coeficiente de reflexão total [16].

A representação geométrica dos raios solares na superfície do satélite é mostrada na Figura 3, tal que  $\theta_i$  é o ângulo de incidência,  $\hat{u}$  é o versor do Sol no sistema orbital,  $\hat{n}$  é o versor normal do satélite e  $dS$  é a superfície infinitesimal do satélite.

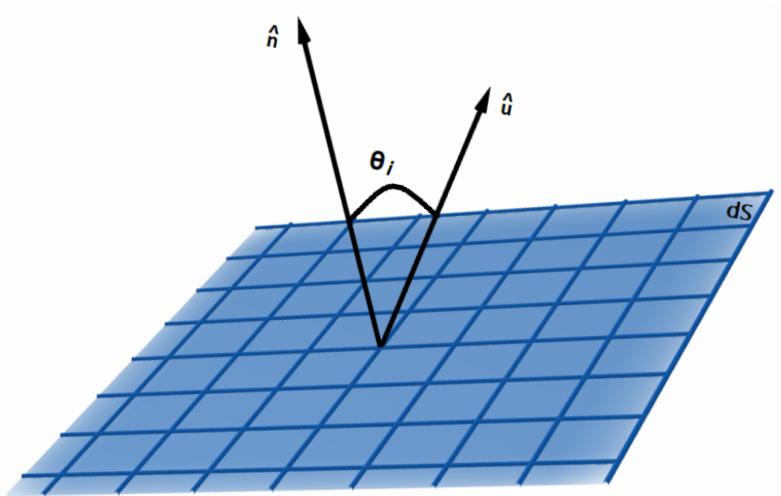


Figura 3: Diagrama ilustrativo da incidência dos raios solares na superfície do satélite. Retirado de [14].

Dessa forma, a energia radiante dos fótons depende de diferentes aspectos e a força de pressão de radiação solar pode sofrer variações com a altitude do satélite por causa da atmosfera terrestre. Nesse contexto, a atmosfera influencia na absorção e no espalhamento solar, sendo que as nuvens são as principais responsáveis pelo espalhamento da radiação, tal que conforme a redução da altitude do satélite, maior a interferência da atmosfera. A força de pressão de radiação solar é calculada através do ângulo de incidência e dos parâmetros ópticos relacionados aos materiais que é feito o satélite.

O Torque de Pressão de Radiação Solar (TPRS) depende diretamente da força de pressão de radiação solar e da distância entre o centro de aplicação dessa força e o centro de massa do satélite. É válido ressaltar que o período de penumbra do satélite não é considerado na análise do TPRS [18].

O incremento do TPRS é definido por:

$$d\vec{T}_S = \vec{r}_S \times d\vec{F}_S. \quad (2.1)$$

em que  $\vec{r}_S$  é o vetor posição entre a força oriunda da energia radiante solar e o centro de massa do satélite, enquanto  $d\vec{F}_S$  é o incremento da força de pressão de radiação solar.

Considerando o torque atuante em toda a superfície do satélite, e sendo  $N$  o número de fótons incidentes na superfície, tem-se que

$$\vec{T}_S = \sum_{i=1}^N \vec{r}_{S_i} \times \vec{F}_{S_i}. \quad (2.2)$$

A equação (2.2) é a forma geral do TPRS. Para um satélite em órbita da Terra, aproximações podem ser consideradas de forma a manter os resultados dentro das especificações desejadas e tornar as equações a serem implementadas e trabalhadas mais simples. Tais simplificações visam um menor tempo de processamento dos resultados e minimização de possíveis erros consequentes de equações muito complexas. No caso do CBERS, o conjunto de equações que representam o modelo do TPRS foi fornecido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) por meio do relatório do CBERS [10].

O modelo customizado para o satélite CBERS e que foi implementado neste trabalho é dado por [10]:

$$\begin{aligned} T_{S_x} &= 4,64 \times 10^{-4} \cos(Wt) + 3,71 \times 10^{-7} - 3,84 \times 10^{-6} |\cos(Wt)| \cos(Wt), \\ T_{S_y} &= 6,83 \times 10^{-6} \sin(Wt) + 1,94 \times 10^{-6} |\sin(Wt)| \sin(Wt), \\ T_{S_z} &= -4,64 \times 10^{-4} \sin(Wt) + 4,13 \times 10^{-6} |\sin(Wt)| \sin(Wt), \end{aligned} \quad (2.3)$$

em que  $W$  é a velocidade angular do satélite [m/s] e  $t$  é o tempo calculado a partir do nodo ascendente [s] e as direções  $X$ ,  $Y$  e  $Z$  são as coordenadas que compõem a base ortonormal do sistema de referência do satélite.

No conjunto de equações (2.3), o produto da velocidade de rotação por um determinado intervalo de tempo é numericamente igual a um ângulo. De acordo com [10], este ângulo é a latitude verdadeira, ou seja, a soma da anomalia verdadeira com o argumento do perigeu.

O objetivo de utilizar as equações (2.3) é poder analisar os resultados dos torques gerados por equações que, de fato, são consideradas na missão do satélite CBERS. Estes resultados serão importantes para, em trabalhos futuros, compará-los com resultados provindos de equações analíticas dos torques, verificando a eficiência das aproximações consideradas nas equações utilizadas no satélite CBERS.

## 2.2 Torque aerodinâmico

Uma vez que o satélite está em órbita, ele sofre influência de diversas forças que podem interferir na rotação e atitude do satélite, prejudicando a missão a que ele foi destinado. Uma dessas é a força aerodinâmica, que é gerada a partir do impacto das partículas de ar existentes no espaço com o corpo do satélite.

Os pontos de contato das partículas de ar no satélite durante o choque são chamados de Centros de Pressão (CP). Assim, considerando a distância de cada um dos CP ao Centro de Massa (CM) do satélite, distâncias essas denominadas de margem estática ( $\bar{m}e$ ) [15], além de considerar o

ângulo de incidência do vetor da força aerodinâmica, observa-se que essas forças geram uma tendência de rotação no satélite, ou seja, geram o Torque Aerodinâmico.

Conforme comentado anteriormente, em satélites de baixas altitudes, como é o caso do CBERS, o Torque Aerodinâmico é bastante atuante. Tal fato ocorre devido a proximidade do satélite com a atmosfera terrestre, onde existe uma maior quantidade de moléculas de ar, aumentando assim a probabilidade de choques entre o corpo do satélite com as moléculas, o que geram mais forças aerodinâmicas e portanto, um TA com magnitude superior aos demais torques [15].

Vale ressaltar a relação do Torque Aerodinâmico com a força de arrasto, força responsável pela resistência de um objeto em um fluido, com a direção e sentido opostos ao movimento do corpo. Essa relação existe pois as forças aerodinâmicas podem ser decompostas em duas componentes, a força de arrasto ( $\vec{D}$ ) e a força de sustentação ( $\vec{L}$ ) [7]. As forças de sustentação de arrasto estão ilustradas na Figura 4.

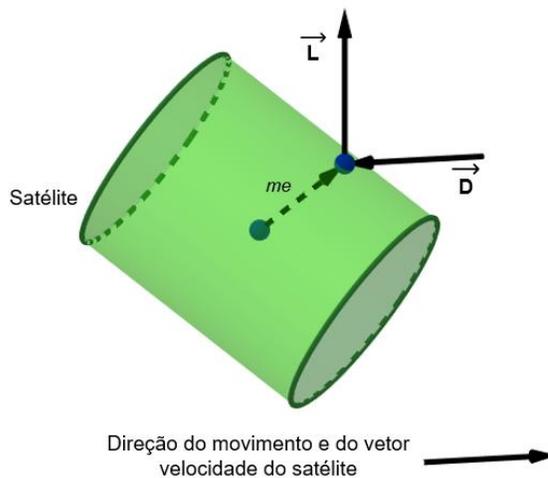


Figura 4: Decomposição da força aerodinâmica em força de arrasto  $\vec{D}$  e força de sustentação  $\vec{L}$  sendo que  $\vec{me}$  é a distância entre o CM e CP. Retirado de [7]

Assim, o módulo do Torque Aerodinâmico gerado por uma única força aerodinâmica pode ser definido por [6]:

$$T_A = \frac{1}{2} \rho v^2 S C_D \lambda. \quad (2.4)$$

em que  $\rho$  é densidade local,  $v$  é velocidade,  $S$  é área transversal à força aplicada no satélite,  $C_D$  é coeficiente de arrasto e  $\lambda$  é comprimento característico.

A equação (2.4) é uma representação geral do TA. Para o caso do satélite CBERS, neste trabalho, foi considerado o modelo customizado em que as componentes do TA nos eixos  $X$ ,  $Y$  e  $Z$  são dadas por [10]:

$$\begin{aligned} T_{Ax} &= 1,45 \times 10^{-6} |\sin(Wt)| \cos(Wt) + 8,05 \times 10^{-7} \cos(Wt), \\ T_{Ay} &= 1,45 \times 10^{-5} |\sin(Wt)| + 8,05 \times 10^{-6}, \\ T_{Az} &= -9,9 \times 10^{-4} |\sin(Wt)| - 7 \times 10^{-6} \cos(Wt) + 9,06 \times 10^{-6}. \end{aligned} \quad (2.5)$$

### 3 RESULTADOS

As informações da órbita são obtidas via PROPAT [3]. O PROPAT é uma ferramenta útil para gerar dados simulados de um satélite e é codificado no *software* MATLAB.

Os dados iniciais que são necessários para o simulador PROPAT são apresentados na Tabela 1, sendo a taxa de amostragem da implementação referente a uma órbita completa para o satélite CBERS, ou seja, de 1h 37min 11s.

Tabela 1: Condições iniciais fornecidas para simular a órbita do CBERS.

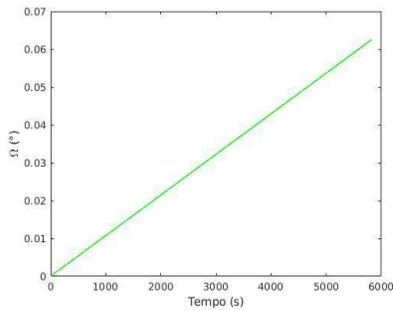
Elementos orbitais	
Argumento do perigeu ( $\omega$ )	0°
Anomalia verdadeira ( $f$ )	0°
Longitude do nodo ascendente ( $\Omega$ )	0°
Inclinação ( $I$ )	97,9987°
Semi-eixo maior ( $a$ )	7 149 km
Excentricidade ( $e$ )	0,01

A partir das informações obtidas pela simulação para uma órbita completa do satélite CBERS (longitude do nodo ascendente, argumento do perigeu e anomalia verdadeira), calcula-se a latitude verdadeira do satélite e, então, é possível calcular os torques TPRS e TA. A Figura 5 apresenta o comportamento dos elementos orbitais utilizados na implementação dos torques.

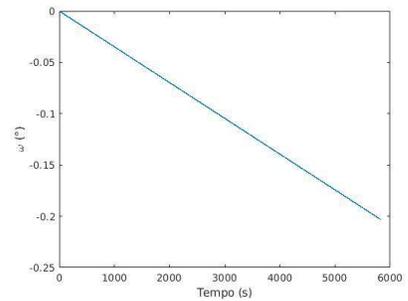
Nas equações (2.3) e (2.5) são apresentados os modelos do torque de pressão de radiação solar e do torque aerodinâmico, respectivamente. A partir das informações obtidas através do propagador, é possível calcular o TPRS e o TA para qualquer instante da órbita.

A Figura 6 apresenta os resultados obtidos para o TPRS e para o TA. Observa-se que as magnitudes do TPRS nos três eixos são da ordem de  $10^{-4}$  Nm no eixo  $X$ ,  $10^{-5}$  Nm no eixo  $Y$  e  $10^{-4}$  Nm no eixo  $Z$ . Portanto, com os três eixos calcula-se a norma do TPRS para uma órbita completa, sendo a magnitude do TPRS da ordem de  $10^{-4}$  Nm.

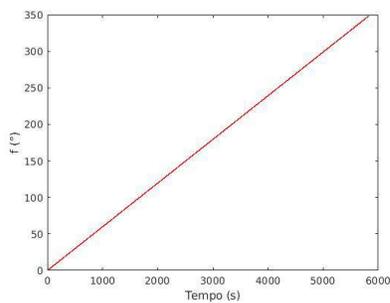
Outrossim, a presença de 4 ciclos observada na Figura 6d provavelmente está relacionada com o painel girante, que busca fazer movimentos para minimizar o ângulo de incidência solar ( $\theta_i$ ), uma vez que o painel solar tende a obter uma iluminação ótima durante o movimento orbital do satélite [2].



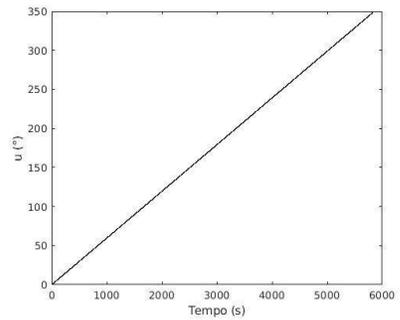
(a) Longitude do nodo ascendente



(b) Argumento do perigeu



(c) Anomalia verdadeira



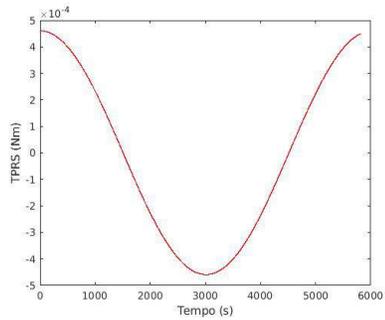
(d) Latitude verdadeira

Figura 5: Elementos orbitais simulados para uma órbita completa.

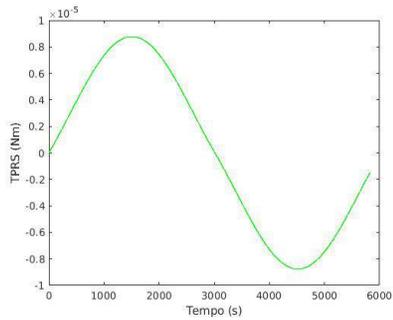
A magnitude do TPRS do eixo Y de  $10^{-5}$  Nm pode ser justificada devido ao centro de pressão da força estar localizado neste eixo, ficando próximo ao centro do painel solar do satélite CBERS.

A Figura 6 mostra o comportamento do Torque Aerodinâmico nos eixos X, Y e Z, além da sua norma. A ordem de grandeza observada para o TA nos eixos X, Y e Z são de  $10^{-6}$  Nm,  $10^{-4}$  Nm, e  $10^{-3}$  Nm, respectivamente, sendo a ordem de grandeza da norma do TA de  $10^{-3}$  Nm.

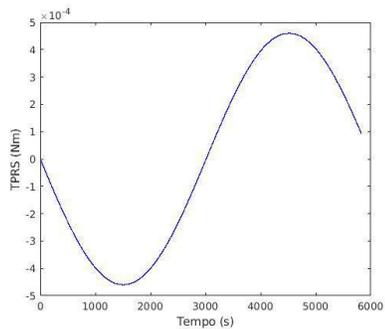
Observa-se na Figura 6 que o TA em todos os eixos apresenta uma característica cíclica. Tal fato pode ser explicado pela trajetória percorrida pelo satélite CBERS, pois como sua órbita é elíptica, haverá momentos em que o satélite se encontrará mais próximo à atmosfera da Terra e momentos em que estará mais distante. Desta forma, quanto mais próximo o satélite se encontrar da atmosfera terrestre, maior o Torque Aerodinâmico, e assim, devido a oscilação do CBERS durante sua trajetória, existirá uma variação cíclica para o TA. Na Figura 6e observa-se uma pequena variação do TA entre os instantes de 2300 e 3500 segundos. Uma hipótese para tal comportamento pode ser explicada pela interferência do painel solar do satélite CBERS, mais informações sobre estas análises podem ser verificadas em [1]. No entanto, mais estudos sobre o impacto dos torques ambientais no painel solar são necessários e que não são analisados neste trabalho, pois não estão no escopo do estudo.



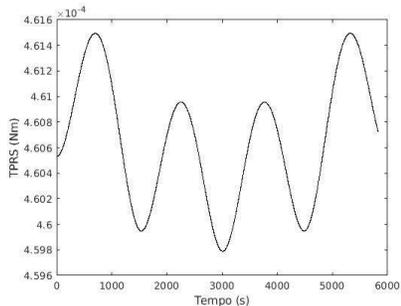
(a) TPRS no eixo X



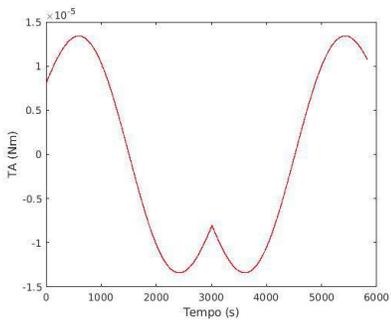
(b) TPRS no eixo Y



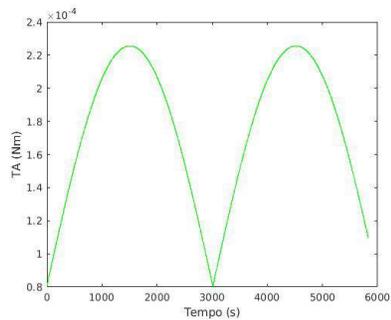
(c) TPRS no eixo Z



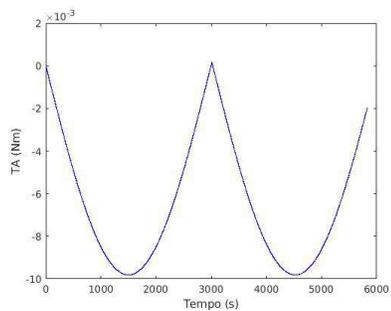
(d) Norma do TPRS



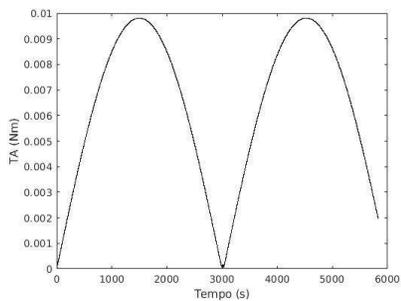
(e) TA no eixo X



(f) TA no eixo Y



(g) TA no eixo Z



(h) Norma do TA

Figura 6: Torque de pressão de radiação solar e torque aerodinâmico para uma órbita do CBERs.

## 4 COMENTÁRIOS FINAIS

Neste trabalho, foram analisados os comportamentos dos Torques de Pressão de Radiação Solar e Aerodinâmico na órbita do CBERS a partir de um modelo customizado para o satélite. É de suma importância a análise de forças externas que agem sobre o satélite, pois tais forças podem ser responsáveis por torques que alteram a orientação nominal do satélite, comprometendo a missão a qual foi destinado.

A partir do modelo considerado [10], observou-se que as magnitudes das normas dos torques TPRS e TA são  $10^{-4}$  Nm e  $10^{-3}$  Nm, respectivamente. Variações foram observadas no comportamento de ambos os torques e, apesar deste trabalho não ter realizado um estudo específico sobre tais variações, este comportamento pode ser justificado devido a existência de um painel solar de área relevante quando comparado com o corpo do satélite. Além disso, o painel do CBERS é girante, o que permite com que o ângulo de incidência solar em suas placas solares seja reduzido, buscando o posicionamento ótimo do painel durante o movimento do satélite. Isto faz com que a placa solar receba mais irradiância de fluxo de fótons do Sol.

Sugere-se que futuros trabalhos possam realizar uma análise mais específica sobre a contribuição do painel solar no comportamento dos toques atuantes no satélite CBERS.

### Agradecimentos

Os autores agradecem o suporte financeiro recebido pelo CNPq por meio do projeto # 138153/2020-5 e à Pró-Reitoria de Pesquisa - USP.

**ABSTRACT.** The growth in the number of launches of artificial satellites for the most different functions has motivated studies related to control, propagation, and orbit and attitude determination activities. In this paper a study of the Solar Radiation Pressure Torque (SRPT) and Aerodynamic Torque (AT) of the CBERS (China-Brazil Earth Resources Satellite) satellite is done when the models used in the satellite mission are considered. The results showed that for satellites in Low Earth Orbit (LEO), as in the case of CBERS, the AT has more relevant effects on the satellite's superficie than the SRPT. These results could be useful for satellite supervision and control in post-launch, and are vital for attitude and orbit control of the CBERS satellite.

**Keywords:** solar radiation pressure torque, aerodynamic torque, CBERS satellite.

### REFERÊNCIAS

- [1] V. Carrara. "Posicionamento ótimo de painéis solares em satélites sol-síncronos". Instituto de Pesquisas Espaciais (1984).
- [2] V. Carrara. "Environmental Disturbance Models for Satellites, EDM" (2013).
- [3] V. Carrara. An open source satellite attitude and orbit simulator toolbox for Matlab. In "Proceedings of the 17th International Symposium on Dynamic Problems of Mechanics" (2015), p. 1–12.

- [4] CBERS/INPE. Sobre o CBERS. URL <http://www.cbbers.inpe.br/sobre/index.php>. Acesso em: 16 dez 2021.
- [5] CBERS/INPE. Órbita do CBERS 04A. URL <http://www.cbbers.inpe.br/sobre/orbita/cbbers04a.php>. Acesso em: 16 dez 2021.
- [6] J.E. Chiaradia, H.K. Kuga & M.C.F. Zanardi. Propagação da Atitude de Satélites Artificiais Estabilizados por rotação com o Torque Aerodinâmico. *Trabalho de Iniciação Científica*, (2010).
- [7] B.G. Cordeiro & R.V. Garcia. “Estudo da interferência do torque aerodinâmico na órbita do satélite CBERS”. Universidade de São Paulo (USP), Lorena (2021). Bolsa PUB.
- [8] J.C.N. Epiphânio. CBERS-3/4: características e potencialidades. In “Proceedings of the Brazilian Remote Sensing Symposium, Curitiba, Brazil”, volume 30 (2011).
- [9] FAA. “The Annual Compendium of Commercial Space Transportation”. Relatório Técnico (2018), 93 p.
- [10] H. Fuming & H.K. Kuga. CBERS simulator mathematical models. *CBTT Project, CBTT/2000/MM/001*, (1999).
- [11] F.L. Markley & J.L. Crassidis. “Fundamentals of spacecraft attitude determination and control”, volume 33. Springer (2014).
- [12] G.B. Motta. Satélites Estabilizados por Rotação e Torque De Radiação Solar Direta (2011). Trabalho de Graduação–Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá.
- [13] G.B. Motta & M.C.F.P.S. Zanardi. Influence of the external torques in the angle between the spin axis and the Sun direction for spin stabilized satellite. *Journal of Physics: Conference Series*, **641**(1) (2015).
- [14] G.A.X. Ribeiro, H.K. Kuga & R.V. Garcia. “Estudo da interferência do torque de pressão de radiação solar na órbita do satélite CBERS”. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos (2021), 41 p. URL <http://urlib.net/ibi/8JMKD3MGP3W34T/45935TB>. Bolsa PIBIC/PIBITI/INPE/CNPq.
- [15] J.R. Wertz. “Spacecraft attitude determination and control”, volume 73. Springer Science & Business Media (2012).
- [16] M.C.F.P.S. Zanardi. “Influência do torque de radiação solar na atitude de um satélite artificial”. Ph.D. thesis, ITA (1993). Tese de doutorado.
- [17] M.C.F.P.S. Zanardi, C.C. Celestino, G.B. Motta, E.M. França & R.V. Garcia. Analysis of analytical attitude propagators for spin-stabilized satellites. *Computational and Applied Mathematics*, **37**(1) (2018), 96–109.
- [18] M.C.F.P.S. Zanardi, R.V. de Moraes, R.E.S. Cabette & R.V. Garcia. Spacecraft’s attitude prediction: solar radiation torque and the Earth’s shadow. *Advances in Space Research*, **36**(3) (2005), 466–471.

