

MODELO DE PRESSÃO DE RADIAÇÃO SOLAR PARA O SATÉLITE TOPEX/POSEIDON

RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA (PIBIC/CNPq/INPE)

Mateus Brizzotti Andrade (FEG/UNESP, Bolsista PIBIC/CNPq) E-mail: <u>mateusbrizzotti@ig.com.br</u>

> Dr. Hélio Koiti Kuga (DMC/INPE, Orientador) E-mail: <u>hkk@dem.inpe.br</u>

Dr. Rodolpho Vilhena de Moraes (DMA/FEG/UNESP, Co-Orientador) E-mail: <u>rodolpho@feg.unesp.br</u>

Julho de 2006

Sumário

1 Introdução	2
2 Modelagem para obtenção das forças	2
3 Implementação Computacional	8
4 Simulações e Testes	10
4.1 Sol na Primavera	11
4.2 Sol no Verão	12
4.3 Sol no Outono	13
4.4 Sol no Inverno	14
4.5 Resultados das simulações	15
5 Conclusões Finais	16
6 Referências Bibliográficas	17

1 Introdução

O satélite TOPEX/Poseidon (T/P) está em órbita desde 1992 e tem como foco de estudo as circulações oceânicas do planeta Terra. Esse satélite tem órbita circular congelada, e conclui o rastreamento terrestre num ciclo que se repete a cada 10 dias. Sua órbita não pode exceder 13 cm na direção radial num período de 10 dias. Essa condição é para atender aos requisitos da sua finalidade científica.

Para que a órbita fique dentro dos parâmetros necessários é importante saber as principais forças que atuam nesse satélite. Muitas forças tendem a desviar a órbita de um satélite tais como: a força devida ao campo gravitacional terrestre, considerando que a distribuição de massa da terra não é homogênea, o arrasto atmosférico, forças devido à pressão de radiação solar direta e indireta, forças devidas ao efeito de marés terrestre, atração do Sol e da Lua etc.

No T/P na sua órbita de altura de 1336 Km, a força de maior magnitude que não a da atração gravitacional terrestre, é a força devido à pressão de radiação solar. A partir disso surge o foco desse trabalho, que é obter as forças que agem no T/P devido à pressão de radiação solar. Foi feita uma modelagem computacional de modo a possibilitar a obtenção dessas forças. Após a modelagem foi implementado um algoritmo utilizando o programa MatLab. Não foram consideradas na modelagem as radiações albedos e infravermelho da Terra. Somente a pressão de radiação direta do sol foi considerada.

2 Modelagem para obtenção das forças

O satélite TOPEX/Poseidon (Ocean Topography Experiment) está em uma circular congelada de 1336 km de altura e com uma inclinação de 66 graus. O T/P possui um sistema de controle de atitude devido ao eixo da placa solar. O satélite realiza uma guinada para que a placa solar receba as radiações solares num ângulo ideal. Para ser possível o cálculo da guinada do satélite foi criado um sistema de coordenadas fixa no satélite. O algoritmo é feito a partir desse sistema de coordenadas. Z aponta para o centro da Terra, Y tem direção positiva oposta ao eixo da placa solar e X completa o sistema. O sistema inercial da órbita do satélite tem origem no centro da Terra, com X_0 normal ao plano da órbita do satélite, Z_0 na direção da projeção do vetor incidente do Sol no plano da órbita do satélite e Y_0 perpendicular aos dois.

As maiores forças não gravitacionais que atuam no satélite são as forças de pressão de radiação solar. O trabalho publicado (Marshall and Luthcke, 1994) descreve detalhadamente um modelo para pressão de radiação solar no satélite T/P. A figura (2.1) mostra um esquema do satélite.



Figura (2.1) – Satélite TOPEX/Poseidon Fonte: Marshall and Luthcke

Neste trabalho foi desenvolvido um macromodelo, para facilitar a obtenção das forças devido a pressão de radiação. O macromodelo aproxima o satélite em uma combinação de placas planas. A figura (2.2) mostra como foi feita esta aproximação.



Figura (2.2) – Macromodelo Fonte: Marshall and Luthcke

As forças de radiações devido à incidência solar, emissões albedo e infravermelho da Terra, são computadas independentemente. Os efeitos de interação das placas como sombreamento, reflexão e condução são ignorados.

Utilizando o macromodelo, as forças são computadas independentemente para cada placa. Conhecendo a força atuante em cada placa é feito a soma para conhecer o efeito no centro de massa do satélite.

Este trabalho segue basicamente o modelo proposto por Marshall e Luthcke. Foram criadas rotinas para o calculo das forças causada pela incidência do Sol na superfície do satélite. A força atuante em cada placa é dada pela equação (2.1), uma vez que as forças são consideradas independentemente para cada placa.

$$\hat{F} = \frac{GA\cos\theta}{c} [2(\delta/3 + \rho\cos\theta)\hat{h} + (1-\rho)\hat{s}]$$
(2.1)

 \vec{F} = Força resultante na placa (N); G = Fluxo de radiação do Sol (W/m²); A = Área superficial de cada placa (m²); δ = coeficiente de reflexão difusa; ρ = coeficiente de reflexão especular;

h =versor normal à placa; s =versor incidente do sol na placa; $\theta =$ ângulo formadao entre h = s'; c =velocidade da luz(m/s).

Os dados referentes ao satélite, como posição e velocidade, estão no sistema de coordenadas inercial da Terra (X,Y,Z) e as forças de pressão de radiação são decompostas no sistema de coordenadas fixo da órbita do satélite (X_0,Y_0,Z_0), por isso é necessário a conversão entre esses sistemas. Para relacionar esses sistemas é necessária a utilização de uma matriz de rotação. Essa matriz relaciona o sistema de coordenadas fixo do satélite com o sistema inercial da Terra. Isso é feito através da utilização dos elementos keplerianos.

$$\mathcal{F}_{in} = R(\Omega, \omega, i) \mathcal{F}_{orb}$$
(2.2)

$$R = \begin{bmatrix} \cos\omega\cos\Omega - sen\Omega sen\omega\cos i & -sen\omega\cos\Omega - \cos\omega sen\Omega\cos i & sen\Omega seni \end{bmatrix}$$
$$R = \begin{bmatrix} \cos\omega sen\Omega + sen\omega\cos\Omega\cos i & -sen\omega sen\Omega + \cos\omega\cos\Omega\cos i & -\cos\Omega seni \\ sen\omega seni & \cos\omega seni & \cosi \end{bmatrix}$$

Onde, Ω é o nódo ascendente, ω é o argumento do pericentro e i é a inclinação.

A posição do Sol na órbita do satélite é dada em função do ângulo β ' que é o ângulo entre o vetor incidente do Sol e o plano da órbita, e α ' que é o ângulo entre Z₀ e a posição Π . A figura (2.3) mostra com detalhes esses ângulos.



Figura (2.3) – Ângulos β ' e α '.

Da equação (2.2), podemos relacionar que,

$$\stackrel{\rho}{r} = R(\Omega, \omega, i)^T \stackrel{\rho}{r_{in}}$$
(2.3)

Sabendo a posição do Sol no sistema inercial (P_{oin}) , e fazendo as devidas substituições temos que:

$$\begin{bmatrix} \cos \beta' \cos \alpha' \\ \cos \beta' \sin \alpha' \\ \sin \beta' \end{bmatrix} = R(\Omega, \omega, i)^T P_{oin}$$
(2.4)
$$sen\beta'$$

O ângulo Ω^* , que mostra a posição do satélite na órbita é calculado conhecendo o ângulo α ' e a anomalia verdadeira f. A figura (2.4) mostra como estão relacionados esses ângulos.



Figura (2.4) – Ângulo Ω^* .

Da figura (2.4) temos que:

$$\Omega^* = (90 - \alpha') + f \tag{2.5}$$

Para obter o ângulo de incidência ideal do Sol na placa solar o satélite deve realizar uma guinada em trono do eixo Z, com ângulo Ψ que é o ângulo de guinada. O ângulo de incidência ideal do Sol na placa solar é calculado em função de β ' e Ω^* . A tabela 2.1 mostra como é calculado o ângulo Ψ .

Disposição da lirecão de guinada	Região β'	Região Ω*	Ψ (β'.Ω*)
Fixo	0.1≤β<+15°	toda	Ψ=0°
-	-15°<β'≤-0,1°	toda	Ψ=180°
	β'≥+80°	toda	Ψ=90°
	β'≤-80°	toda	Ψ=-90°
Sinusoidal	β'>15°	toda	Ψ=90°+(90°-β')cosΩ*
	β'<-15°	toda	Ψ=-90°-(90°+β')cosΩ*
Subindo	β'=+15°	90°≤Ω*≤180°	Ψ=β'cos²Ω*
	β'=-15°	270°≤Ω*≤360°	Ψ=β'cos²Ω*-180°
Descendo	β'=+15°	180°≤Ω*≤270°	Ψ=β'cos²Ω*
	β'=-15°	0°≤Ω*≤90°	Ψ=β'cos²Ω*-180°

Tabela (2.1) – Disposição do ângulo de guinada Fonte: Marshall, Antresian, Rosborough and Putney(1991).

A placa solar realiza arfagem ("pitch") com ângulo Φ , definido como ângulo de arfagem, para que possa ser obtido o ângulo de incidência ideal do Sol. O ângulo Φ é obtido em função dos ângulos Ψ , β ' e Ω *. A equação (2.6) mostra como é obtido o ângulo Φ (Artesian and Rosborough, 1992).

$$\Phi = 180^{\circ} + \tan^{-1} \left[\frac{sen\Omega^* \cos\beta'}{\cos\Psi \cos\Omega^* \cos\beta' - sen\Psi sen\beta'} \right]$$
(2.6)

Os versores normais de cada placa são dados na tabela (2.2).

- 1 onte: Marshan and Editecte(1994).			
Placa	Х	Y	Z
X+	1,0	0,0	0,0
Х-	-1,0	0,0	0,0
Y+	0,0	1,0	0,0
Y-	0,0	-1,0	0,0
Z+	0,0	0,0	1,0
Z-	0,0	0,0	-1,0
SA+	1,0	0,0	0,0
SA-	-1,0	0,0	0,0

Tabela (2.2) – Versores normais a cada placa no sistema de coordenadas fixo do satélite. Fonte: Marshall and Luthcke(1994)

Na equação (2.1) temos que a força devido à pressão a radiação solar é dada em função dos vetores ξ e h. Portanto, para obter a força em cada placa devemos colocá-la no sistema inercial, ou seja, devemos decompor os vetores ξ e h.

O valor de h é obtido é obtido pela equação:

$$\dot{h}_{i}^{\prime} = R(\Omega, \omega, i)R(\Psi)\dot{h}_{p}^{\prime}$$
(2.7)

Onde,

$$R(\Psi) = \begin{bmatrix} \cos \Psi & -sen\Psi & 0\\ sen\Psi & \cos \Psi & 0\\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Para a placa X+:
$$h_{X+}^{\rho} = \begin{bmatrix} 1\\ 0\\ 0 \end{bmatrix}$$

Como todos os valores são conhecidos, podemos obter o versor h_1^{o} substituindo na equação (2.7). Portanto teremos:

$$\overset{O}{h_1}=R(\Omega,\omega,i)R(\Psi)\overset{O}{h_{X+}}$$

Deve ser feito analogamente para as placas X-, Y+, Y-, Z+ e Z-. Para a placa solar os versores h_{SA+}^{ρ} e h_{SA-}^{ρ} , são dados em função do ângulo de arfagem Φ :

O versor ξ' é obtido segundo a equação (2.8):

$$\beta = \frac{\beta_{oin} - \beta}{|\beta_{oin} - \beta|}$$
(2.8)

Sendo que os vetores posição do Sol $(\overset{P}{r_{oin}})$ e posição do satélite $(\overset{P}{r})$ são conhecidos. As características ópticas e térmicas das placas são dadas segundo a tabela (2.3).

Fonte: Marshall and Luthcke(1994) Х+ Х-Y+ Y-Z+ Z-SA+ SA-Área 3,74 3,77 8,27 8,07 8,67 8,44 21,4 21,44 Reflexão Especular 0,201 0,244 0,886 0,782 0,239 0,275 0,05 0,17 Reflexão Difusa 0,375 0,386 0,302 0,339 0,39 0,363 0,22 0,66

Tabela (2.3)-Características ópticas e térmicas das placas.

O termo $\cos\theta$ da equação (2.1) é dado por:

$$\cos\theta_i = h_i \bullet S \tag{2.9}$$

A partir de tudo que foi mostrado, temos dados suficientes para calcular a força de pressão de radiação solar que atua no satélite TOPEX/Poseidon. Substituindo os valores para cada placa na equação (2.10) podemos obter as forças.

A força em cada placa é dada por:

$$\hat{F}_{i} = \frac{GA_{i}\cos\theta}{c} \left[2(\delta_{i}/3 + \rho_{i}\cos\theta_{i})\hat{h}_{i} + (1 - \rho_{i})\hat{s} \right]$$
(2.10)

Utilizando essa equação para todas as placas, temos a força total atuando no centro de massa do satélite:

$$\hat{F} = \sum_{i=1}^{8} F_i \tag{2.11}$$

3 Implementação Computacional

A implementação computacional se deu por meio de 4 subrotinas para facilitar o trabalho. Cada uma delas fica responsável por calcular uma parte da modelagem. Há ainda uma outra subrotina onde é executado todo o programa. O implementação foi feita utilizando o programa MatLab.

1ª Rotina – Obtenção de F' e F_{oin} .

Atribuindo valores a Ω , ω , i e f, e fixando valores do vetor posição do sol F_{oin} obtemos através da equação (2.2) e (2.3) o vetor posição do satélite F.

2ª Rotina - Cálculo de α', β' e Ω*.

Substituindo os valores calculados na 1^a rotina em (2.4) encontramos os valores de α ' e β '. A partir disso é possível encontrar o valor de Ω * substituindo α ' em (2.5).

3^{a} Rotina – Cálculo de Ψ e Φ .

Utilizando o valor de β' e Ω^* , encontrado na 1^a rotina, e a partir da tabela (2.1) encontramos o valor de Ψ .

Substituindo β' , $\Omega^* \in \Psi$ na equação (2.6), encontramos o ângulo de arfagem Φ .

4ª Rotina – Cálculo da força que age no satélite.

Através da tabela (2.2) e da equação (2.7), encontramos o versor normal h' de cada placa do satélite.

Utilizando a equação (2.8), encontramos o versor de incidência do sol S.

A partir da tabela (2.3) e da equação (2.9) substituindo em (2.10) para cada placa, temos a força atuante em cada placa. Usando (2.11) obtemos a força que age no centro de massa do satélite devido à pressão de radiação.

5° Programa principal

Para reunir todos os cálculos das rotinas foi feito um programa. Esse programa é responsável por inserir em cada rotina o cálculo da rotina anterior, e por fim através da força obtida, obter a aceleração realizada pelo satélite.

4 Simulações e Testes

Os testes foram realizados seguindo os parâmetros adotados em Antreasian and Rosborough (1992), para que pudesse haver comparação de resultados.

Todos os resultados foram obtidos utilizando o *software* MatLab. O período considerado nos testes foi de somente uma órbita. Foi posicionado o Sol nas quatro estações do ano para verificar se a posição do Sol tem influência com os parâmetros adotados. Foram gerados gráficos para saber como varia a aceleração em um período orbital.

Parâmetros adotados para a órbita:

Tabela 4.1 – Parâmetros orbitais		
Inclinação	i	66°
Excentricidade	е	0.0
Semi-eixo maior	а	7714 km
Altitude	h	1336000 km
Argumento do Perigeu	ω	90°

Constantes adotadas nas simulações:

Tabela 4.2 – Constantes.			
Velocidade da Luz	с	299.792.458m/s	
Constante solar	G	1367,7 W/m²	
Raio da Terra	R_{s}	6.378.137 m	
Massa do Satélite	m _s	2.500 Kg	

No trabalho publicado por Antreasian and Rosborough (1992), o ângulo entre o Sol e o plano da órbita β ' foi considerado 40°. Para efeitos comparativos que se fixou $\beta'=40^\circ$, uma vez que o artigo publicado em 1992 (Antreasian and Rosborough) utilizou esse mesmo parâmetro. Dessa forma é possível saber se é válido o algoritmo criado. O nodo ascendente (Ω) é um valor arbitrário é nos casos seguintes utilizou-se $\Omega = 180^\circ$.

4.1 Sol na Primavera

O gráfico 4.1.1 é obtido posicionando o Sol na Primavera. Comparando o gráfico 4.1.1 com o gráfico 4.1.2 vemos que a curva obtida por este modelo aproxima muito da curva do trabalho publicado por Antreasian and Rosborough (1992). O modelo de Antreasian and Rosborough (1992) considera o período em que a luz solar não incide no satélite. Esse período onde a aceleração do satélite devido à pressão de radiação é zero se deve ao fato de o satélite se encontrar "atrás" da Terra, ou seja, a luz que incidiria no satélite é interrompida por a Terra entrar na frente do satélite em relação ao Sol. No modelo deste trabalho esse período de incidência nula de luz é desconsiderado. O vetor de posição solar considerado para a primavera é igual a $P_{oin} = [149.6x10^9;0;0]$ em [m].



Gráfico 4.1.1 – Aceleração x Ângulo da órbita – Simulação da Primavera.

Gráfico 4.1.2 - Aceleração x Ângulo da órbita – Simulando o Sol na Primavera. Fonte Antreasian and Rosborough (1992).



O gráfico 4.2 mostra as componentes e o módulo da aceleração para a posição do Sol fixada no Verão. O vetor para a posição solar considerado para o verão é igual a

 $p_{coin}^{o} = [0;149.6x10^{9}.\cos(23^{\circ});0] \text{ em [m]}.$



4.3 Sol no Outono

O gráfico 4.3 ilustra as componentes da aceleração para a posição do Sol no Outono. O vetor considerado para a posição solar fixada no Outono é igual $p_{oin}^{p} = [-149.6x10^{9};0;0]$ em [m].



4.4 Sol no Inverno

O gráfico 4.4 mostra as componentes da aceleração para a posição do Sol no Inverno. O vetor considerado foi o $P_{oin}^{\rho} = [0; -149.6x10^{9}.cos(-23^{\circ}); 149.6x10^{9}.sen(23^{\circ})]$ em [m].



4.5 Resultados das simulações

Os gráficos obtidos refletem a aceleração que o satélite realiza em cada época do ano. Essa aceleração pode fazer com que o satélite tenha de sofrer uma correção em sua órbita ao longo do tempo em que está operando. A tabela 4.5 mostra os valores de aceleração máximo e mínimo em cada simulação.

Estação do Ano	Aceleração Máxima (Módulo)[nm/s²]	Aceleração Mínima (Módulo)[nm/s²]
Primavera	65	52
Verão	75	25
Outono	53	48
Inverno	78	23

Tabela 4.5 – Acelerações máxima e mínima para as estações do ano.

No caso do TOPEX/Poseidon, é muito importante conhecer essas acelerações, uma vez que a maior força atuante, que não a gravitacional, é a força de pressão de radiação solar.

5 Conclusões Finais

Este trabalho que tem como objetivo desenvolver um modelo computacional para calcular as forças devido à pressão de radiação solar atuando no satélite TOPEX/Poseidon. O modelo criado cumpriu com os objetivos e obteve-se a força no centro de massas do satélite e consequentemente a aceleração.

Como o satélite TOPEX/Poseidon não pode sofrer um desvio maior que 13 cm na direção radial sobre o período de 10 dias, é muito importante detalhar com precisão as forças atuantes. E como a força devido à pressão de radiação solar é a maior força atuante nesse satélite que não a gravitacional, esse estudo é de grande importância para esse satélite.

Embora o modelo criado seja específico para o satélite T/P, pode-se utilizar essa modelagem para outros satélites realizando-se pequenas modificações no presente modelo.

Foram consideradas somente as forças de pressão de radiação solar direta, não considerando radiações albedo e infravermelho. Não foi considerado o período em que a Terra interrompe a incidência de luz solar no satélite.

Para cada época do ano a aceleração que o satélite é submetido devido à pressão de radiação tem características diferentes.

6 Referências Bibliográficas

- Marshall, J. A., Antreasian, P.G., Rosborough, Putney, B.H., "Modeling Radiation Forces Acting on Satellites for Precision Orbit Determination," *Proceedings of the AAS/AIAA Astrodynamics Conference*, (Durango,CO), AAS Paper 91-357, Aug.1991.
- Artesian, P.G., and Rosborough, G.W., "Prediction of Radiant Energy Forces on the TOPEX/POSEIDON Spacecraft," *Journal of Spacecraft and Rockets*, Vol. 29, No. 1,1992, pp. 81-90.
- Marshall, J. A. and Luthcket, S. B., "Modelling Radiation Forces on TOPEX/Poseidon for Precision Orbit Determination," *Journal of Spacecraft and Rockets*, Vol 31, No. 1, January-February, 1994.
- El'y Asberg, P.E., "Introduction to the Theory of Flight of Artificial Earth Satellites", Mechanics of space Flight. Israel Program for Scientific Translations, Jerusalem 1967.
- Dian, G. H, Relatório Final, Modelo de Pressão de Radiação Solar Para o Satélite TOPEX/Poseidon, 2005.