



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

Propagação Numérica da Atitude de Satélites Artificiais, Estabilizados por Rotação, com Quatérnions e Torques Externos

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

Tatiane Scarabel Pelosi (UNESP, Bolsista PIBIC/CNPq)

E-mail: tatiane_pelosi@hotmail.com

Dr. Valcir Orlando (CCS/INPE, Orientador)

E-mail: valcir@ccs.inpe.br

Prof^ª. Dra. Maria Cecília F. P. S. Zanardi (DMA/UNESP, Co-orientadora)

E-mail: mceciliazanardi@gmail.com

Julho de 2015

AGRADECIMENTOS

A meus familiares que sempre me deram apoio, aos meus professores, principalmente a Professora Dra. Maria Cecília Zanardi que me acolheu e forneceu essa possibilidade de trabalho além de abrir meus horizontes estudantis e pessoais. Ao Professor Dr. Valcir Orlando que sempre esteve disponível e me apoiou. Ao meu namorado que sempre me motiva. Ao Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento - CNPq pelo apoio financeiro recebido através da bolsa de iniciação científica junto ao programa PIBIC do INPE.

RESUMO

Este trabalho envolve a análise da influência de torques externos na atitude de satélites artificiais, com aplicações voltadas para satélites estabilizados por rotação. A atitude do satélite sofre a ação de torques externos, devido à existência de perturbações ambientais, tais como a de origem magnética, a atração da gravidade, o arrasto atmosférico, o potencial elétrico e a incidência da radiação solar. Deste modo o objetivo deste projeto é realizar simulações numéricas a partir das equações do movimento rotacional em termos das componentes da velocidade de rotação e dos quatérnions, incluindo simultaneamente os torques aerodinâmicos, de gradiente de gravidade, elétricos, magnéticos e o torque devido a força de pressão de radiação solar direta. São utilizados a linguagem FORTRAN e o método de integração numérica de Runge-Kutta. As aplicações são realizadas para os Satélites Brasileiros de Coleta de Dados ambientais, SCD1 e SCD2. A integração numérica é realizada nas equações do movimento, parametrizadas em termos dos quatérnions e das componentes da velocidade de rotação do satélite. Os resultados numéricos são então transformados nos ângulos de ascensão reta e declinação do eixo de rotação do satélite e da magnitude da velocidade de rotação. Os resultados obtidos são comparados com os valores da velocidade de rotação, ascensão reta e declinação do eixo de rotação fornecidos pelo Centro de Rastreo e Controle do INPE, para qualificar a metodologia adotada. O valor do ângulo de aspecto solar também é objeto de comparação. Saliente-se que, apesar da aplicação ter sido realizada para os satélites estabilizados por rotação, o programa computacional desenvolvido pode se facilmente adaptado para qualquer tipo de satélite, alterando apenas a entrada dos dados iniciais de atitude.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Comportamento temporal do ângulo de ascensão reta para o satélite SCD1, com atualização diária.....	19
Figura 2 – Comportamento temporal do ângulo de declinação para o satélite SCD1, com atualização diária.....	20
Figura 3 – Comportamento temporal da velocidade angular para o satélite SCD1, com atualização diária.....	20
Figura 4 – Valores do ângulo de aspecto solar para o satélite SCD1, com atualização diária.....	22
Figura 5 – Comportamento temporal do ângulo de ascensão reta para o satélite SCD2 com atualização diária.....	23
Figura 6 – Comportamento temporal do ângulo de declinação para o satélite SCD2 com atualização diária.....	24
Figura 7 – Comportamento temporal da velocidade angular para o satélite SCD2 com atualização diária.....	25
Figura 8 - Valores do ângulo de aspecto solar para o satélite SCD1, com atualização diária.....	26
Figura 9 – Variação temporal do ângulo de ascensão reta numérico, analítico e o real..	27
Figura 10 – Variação temporal do ângulo de declinação numérico, analítico e o real....	28
Figura 11 – Variação temporal da velocidade de rotação numérico, analítico e o real...	29
Figura 12 – Variação temporal do erro de apontamento numérico, analítico e o real.....	29
Figura 13 – Variação temporal do ângulo de ascensão reta numérico, analítico e o real	31
Figura 14 – Variação temporal do ângulo de declinação numérico, analítico e o real....	32
Figura 15 – Variação temporal da velocidade de rotação numérico, analítico e o real...	33
Figura 16 – Variação temporal do erro de apontamento numérico, analítico e o real.....	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores do ângulo de ascensão reta, declinação e velocidade angular do satélite SCD1, com atualização de dados em comparação com os valores fornecidos pelo INPE.....	18
Tabela 2 - Valores do ângulo de ascensão reta, declinação e velocidade angular do satélite SCD1, com atualização de dados em comparação com os valores fornecidos pelo INPE.....	21
Tabela 3 – Valores do ângulo de aspecto solar em comparação com dados do INPE.....	21
Tabela 4 - Valores do ângulo de ascensão reta, declinação e velocidade angular do satélite SCD2, com atualização de dados em comparação com os valores fornecidos pelo INPE.....	23
Tabela 5 - Valores do ângulo de aspecto solar em comparação com dados do INPE.....	25
Tabela 6 - Valores do ângulo de ascensão reta comparados na forma de analítico, numérico e real.....	26
Tabela 7 - Valores do ângulo de declinação comparados na forma de analítico, numérico e real.....	27
Tabela 8 - Valores da velocidade de rotação comparados na forma de analítico, numérico e real.....	41
Tabela 9 - Valores do ângulo de ascensão reta comparados na forma de analítico, numérico e real.....	30
Tabela 10 - Valores do ângulo de declinação comparados na forma de analítico, numérico e real.....	31
Tabela 11 - Valores da velocidade de rotação comparados na forma de analítico, numérico e	

real.....	32
Tabela A1 – Dados do satélite SCD1 fornecidas pelo CRC/INPE.....	37
Tabela A2 – Dados do satélite SCD2 fornecidas pelo CRC/INPE.....	39
Tabela B1 – Ascensão reta e declinação do sol para o período de simulação do SCD1.....	39
Tabela B2 – Ascensão reta e declinação do sol para o período de simulação do SCD2.....	41

LISTA DE SÍMBOLOS

a	- semi eixo maior
\vec{B}	- campo magnético terrestre local
e	- excentricidade
f	- anomalia verdadeira
I	- inclinação da órbita
I_x, I_y e I_z	- momentos principais de inércia do satélite
$\vec{I}, \vec{J}, \vec{K}$	- vetores unitários do sistema Inercial ou Equatorial
$\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$	- vetores unitários no Sistema do Satélite
$\hat{i}_m, \hat{j}_m, \hat{k}_m$	- vetores unitários do Sistema Magnético
l	- módulo do vetor do momento magnético do campo terrestre
M_x, M_y e M_z	- componentes dos torques externos atuantes no satélite no sistema do satélite
\vec{M}	- soma dos momentos magnéticos individuais do satélite
M	- matriz de Atitude ou Matriz de Rotação
O	- centro de massa do Satélite
O'	- centro de massa da Terra
$O'x_my_mz_m$	- Sistema Magnético
$OXYZ$	- Sistema Equatorial
$Oxyz$	- Sistema do Satélite
OZ	- eixo de maior momento principal de inércia
$O'XYZ$	- Sistema Inercial
P	- coeficiente que depende da geometria do satélite e da condutividade do material.
p, q e r	- componentes da velocidade de rotação no sistema do satélite.
R_T	- raio equatorial da Terra
\vec{r}	- vetor posição do centro de massa do satélite ao centro de massa da Terra
w	- argumento do perigeu

W	- módulo da velocidade de rotação
W_I	- velocidade de rotação no sistema equatorial
X, Y, Z	- coordenadas de um vetor no sistema inercial
x, y, z	- coordenadas de um vetor no sistema de eixos principais
α	- ascensão reta do eixo de rotação
δ	- declinação do eixo de rotação
μ_0	- permeabilidade do espaço livre
\hat{k}_m	- vetor unitário que descreve a direção do momento geomagnético
β	- inclinação do vetor de dipolo em relação ao eixo equatorial OZ
η	- argumento do nodo ascendente do equador geomagnético
ϕ	- ângulo de rotação
Ω	- longitude do nodo ascendente
χ	- ângulo de aspecto solar

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	12
2. DESENVOLVIMENTO.....	12
2.1. Torque elétrico ou devido á força de Lorentz.....	13
2.2. Torque magnéticos.....	14
2.2.1. Torque devidos a momentos magnéticos do satélite.....	14
2.2.2. Torque devido a corrente de Foucault.....	15
2.3. Torque de gradiente de gravidade.....	15
2.4. Torque de radiação solar.....	16
2.5. Torque aerodinâmico	17
3. ÂNGULO DE ASPECTO SOLAR.....	18
4. RESULTADOS.....	19
4.1. Abordagem com atualização de dados para os satélites SCD1 e SCD2.....	20
4.1.1. SCD1.....	20
4.1.2. Ângulo de aspecto solar com valores do SCD1.....	23
4.1.3. SCD2.....	24
4.1.4. Ângulo de aspecto solar com valores do SCD2.....	27
4.2. Comparação das simulações numéricas com os cálculos analíticos.....	28
4.2.1. SCD1.....	28
4.2.2. SCD2.....	32
5. CONCLUSÃO.....	36
6. BIBLIOGRAFIA.....	38
APÊNDICE A.....	37
APÊNDICE B.....	40

1. Introdução

Este estudo é focado na análise dinâmica da atitude de satélites artificiais, estabilizados por rotação, através de sua representação por quatérnions. Esses corpos sofrem, no espaço, a interferência de torques externos, tais como: torque de gradiente de gravidade, torque de pressão e radiação solar, torque elétrico (também chamado de correntes de Foucault), torque aerodinâmico, torque magnético. Neste trabalho são apresentados alguns modelos matemáticos desenvolvidos pela literatura, salientando os diferentes parâmetros relacionados com cada um deles.

A propagação numérica das equações do movimento de atitude, nas quais são incluídos os componentes de cada torque considerado, será realizada com auxílio do método de Runge-Kutta implementado na linguagem de programação FORTRAN. Consideram-se as equações do movimento descritas em termos de quatérnions e das componentes da velocidade de rotação. Para a validação da metodologia adotada são realizadas simulações numéricas utilizando dados fornecidos pelo Centro de Rastreamento e Controle de Satélites do INPE (CRC/INPE) para os Satélites Brasileiros de Coleta de Dados - SCD1 e SCD2. Saliente-se que em fevereiro de 2015 o CRC disponibilizou uma grande quantidade de dados destes dois satélites, englobando todo o período de atividades de cada satélite, até esta data. Deste modo, além do período regular de 40 dias que vem sendo utilizado em trabalhos anteriores, foi possível também escolher períodos mais atuais para realizar as simulações.

As integrações numéricas são realizadas em termos do quatérnions de atitude e das componentes da velocidade de rotação, evitando problemas de singularidades das equações de Euler e obtendo uma economia computacional, por meio da ausência de necessidade de integração de funções trigonométricas. Deste modo, os dados iniciais que são fornecidos pelo CRC em termos do módulo da velocidade de rotação e dos ângulos de ascensão reta e declinação do eixo de rotação são transformados em quatérnions de atitude e nas componentes da velocidade de rotação no sistema de eixos principais do satélite. No final da integração numérica, os valores obtidos para os quatérnions de atitude e para as componentes da velocidade de rotação são transformados nos ângulos de ascensão reta e declinação e no módulo de velocidade angular, para fins de comparações (ZANARDI et al, 2012).

Os valores numéricos resultantes das simulações são também a uma comparação com os resultados analíticos calculados no trabalho de Motta (2014).

2. Desenvolvimento

As equações de Euler (ZANARDI, 1990; WERTZ, 1978) e as equações que descrevem a taxa de variação das componentes do quatérnion (PISACANE;MOORE, 1994) são dadas por:

$$\dot{p} = \frac{T_x}{I_x} + \left(\frac{I_y - I_z}{I_x} \right) qr \quad (2.1)$$

$$\dot{q} = \frac{T_y}{I_y} + \left(\frac{I_z - I_x}{I_y} \right) pr \quad (2.2)$$

$$\dot{r} = \frac{T_z}{I_z} + \left(\frac{I_x - I_y}{I_z} \right) pq \quad (2.3)$$

$$\dot{q}_1 = \frac{I}{2} [pq_4 - qq_3 + rq_2] \quad (2.4)$$

$$\dot{q}_2 = \frac{I}{2} [qq_4 - rq_1 + pq_3] \quad (2.5)$$

$$\dot{q}_3 = \frac{I}{2} [rq_4 - pq_2 + qq_1] \quad (2.6)$$

$$\dot{q}_4 = \frac{I}{2} [pq_1 + qq_2 + rq_3] \quad (2.7)$$

I_x , I_y e I_z são os momentos principais de inércia do satélite, T_x , T_y e T_z são as componentes dos torques externos atuantes no satélite no sistema de eixos principais do satélite (aqui denominado sistema do satélite); e p , q e r são as componentes da velocidade de rotação no sistema do satélite.

As modelagens utilizadas neste trabalho já foram desenvolvidas em projetos anteriores (BENTO, 2010; ZANARDI et al, 2010; ISHIBASHI et al, 2012; ZANARDI et al, 2012; CARVALHO, 2012).

A matriz de atitude A , que relaciona o sistema do satélite com o sistema equatorial e é dada por (SHUSTER em 1993):

$$A = \begin{bmatrix} q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 + q_4^2 & 2(q_1q_2 + q_4q_3) & 2(q_3q_1 - q_4q_2) \\ 2(q_2q_1 - q_4q_3) & -q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 + q_4^2 & 2(q_3q_2 + q_4q_1) \\ 2(q_3q_1 + q_4q_2) & 2(q_3q_2 - q_4q_1) & -q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 + q_4^2 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

ou, de forma análoga compactada:

$$A = \begin{bmatrix} q_A & q_D & q_G \\ q_B & q_E & q_H \\ q_C & q_F & q_I \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

A seguir será feita uma breve introdução dos torques externos que estão sendo considerados neste trabalho.

2.1. Torque Elétrico ou Devido á Força de Lorentz

O torque elétrico ou devido á força de Lorentz é o torque gerado pelo aumento do potencial elétrico dentro do satélite. Este aumento produz uma diferença de potencial na superfície externa do mesmo ou entre a superfície e o interior. Caso seja ultrapassado o limite de ruptura é gerado uma descarga eletrostática que produz um movimento de

precessão e até um deslocamento do satélite em órbita. Os principais parâmetros deste torque são os seguintes: a velocidade de rotação do satélite, a velocidade de rotação diurna do campo geomagnético e a da Terra e a inércia da blindagem de proteção, parâmetro físico este que define a carga elétrica do satélite.

O modelo matemático deste torque, desenvolvido por Sehnal (1969) é o seguinte:

$$\vec{F} = Q \vec{V} \times \vec{B} \quad (2.10)$$

Na expressão têm-se os seguintes parâmetros: Q é a carga elétrica do satélite, \vec{V} a velocidade do satélite em órbita e $\vec{B} = B\hat{\beta}$ é o campo magnético da Terra, cuja orientação (versor $\hat{\beta}$) é definida pelo modelo de vetor de dipolo.

2.2. Torques Magnéticos

São os toques provenientes da interação entre o campo magnético do satélite e o campo geomagnético. Neste trabalho serão considerados apenas o torque magnético do satélite, também chamado de residual e o torque devido as correntes de Foucault.

2.2.1. Torque Devido ao Momento Magnético do Satélite

Como apresentado em Wertz (1978), este torque ocorre devido ao momento magnético ao longo do eixo de rotação do satélite e causa um movimento de precessão do eixo de rotação. O modelo deste torque é dado por:

$$\vec{N}_R = \vec{M}_S \times \vec{B} \quad (2.11)$$

Em que: \vec{B} é o campo magnético terrestre local e \vec{M}_S é a soma dos momentos magnéticos individuais do satélite, que são devidos aos equipamentos eletrônicos e materiais magnéticos a bordo dos satélites (momento magnético residual) e às possíveis bobinas de torque existentes a bordo para permitir o controle de atitude do satélite. Neste trabalho é considerado que o momento magnético residual do satélite se alinha com seu eixo de rotação, como é o caso dos satélites de coleta de dados do INPE.

As componentes do torque magnético foram modeladas por Sene (2008), do seguinte modo:

$$\vec{N}_R = -B_y M_S \vec{i} + B_x M_S \vec{j} \quad (2.12)$$

com

$$N_{R_x} = -B_y M_S \quad (2.13)$$

$$N_{R_y} = B_x M_S \quad (2.14)$$

$$N_{R_z} = 0 \quad (2.15)$$

onde: B_x , B_y e B_z são os componentes do campo magnético terrestre \vec{B} como fornecido por Wertz (1978).

2.2.2. Torque Devido às Correntes de Foucault

Este torque é devido às correntes de Foucault geradas nas superfícies metálicas do satélite. Sua principal consequência é o decaimento com perfil exponencial da velocidade de rotação do veículo. Este toque é descrito como (WERTZ, 1978):

$$\vec{N}_F = P_F \vec{B} \times \left(\vec{B} \times \vec{W}_{sat} \right) \quad (2.16)$$

onde: \vec{B} é o campo magnético terrestre local, \vec{W}_{sat} é a velocidade angular de rotação e P_F é um coeficiente que depende da geometria do satélite e da condutividade do material, também conhecido como Parâmetro de Foucault.

Considerando que o satélite seja estabilizado por rotação e tomando por referência o sistema principal do satélite, as componentes deste torque podem ser expressas por (SENE, 2007):

$$\vec{N}_F = N_{F_x} \vec{i} + N_{F_y} \vec{j} + N_{F_z} \vec{k} \quad (2.17)$$

onde:

$$N_{F_x} = P_F [B_y (B_x q - B_y p) - B_z (B_z p - B_x r)] \quad (2.18)$$

$$N_{F_y} = P_F [B_z (B_y r - B_z q) - B_x (B_x q - B_y p)] \quad (2.19)$$

$$N_{F_z} = P_F [B_x (B_z p - B_x r) - B_y (B_y r - B_z q)] \quad (2.20)$$

2.3. Torque de Gradiente de Gravidade

Este torque é gerado pela diferença de atração da força gravitacional em cada elemento infinitesimal de massa (dm) pertencente ao satélite. Cada dm será atraído com

uma certa intensidade e direção. Chamando de \vec{r}_T ao vetor posição de um elemento de massa, em relação ao centro de massa da Terra (CM), então a força gravitacional que atua no elemento será dada por (MOORE e PISACANE, 1994).

$$d\vec{F} = -\mu dm \frac{\vec{r}_T}{r_T^3} \quad (2.21)$$

onde:

$\mu = 3,986 \times 10^{14} [m^3/s^2]$ é a constante gravitacional da Terra;

\vec{r}_T é o vetor posição do elemento de massa em relação ao CM da Terra.

O modelo matemático desenvolvido para este torque é dado por:

$$d\vec{N}_G = \vec{r}_o \times d\vec{F} \quad (2.22)$$

em que \vec{r}_o é o vetor posição do elemento de massa (dm) em relação ao CM do satélite, e

$$\vec{r}_o = x_o \vec{i}_o + y_o \vec{j}_o + z_o \vec{k}_o \quad (2.23)$$

Desenvolvendo os cálculos de maneira correta, chega-se ao torque com suas componentes dadas no sistema principal (SENE,2007):

$$\vec{N}_G = 3 \frac{\mu}{r'^3} \left[a_{21} a_{31} (I_z - I_y) \vec{i} + a_{11} a_{31} (I_x - I_z) \vec{j} + a_{11} a_{21} (I_y - I_x) \vec{k} \right] \quad (2.24)$$

Nesta equação, r' é o módulo do vetor posição que liga o centro de massa do satélite ao centro de massa da Terra, I_x , I_y e I_z , os momentos principais de inércia do satélite e os elementos a_{11} , a_{21} e a_{31} são dados em termos dos quatérnions de atitude e dos elementos orbitais angulares.

2.4. Torque de Radiação Solar (TRS)

São considerados neste projeto apenas satélites cilíndricos como visto no modelo matemático de Ishibashi (2012), já que a geometria do satélite interfere diretamente para este torque.

A pressão de radiação solar, que gera o TRS, é causada pelo contínuo fluxo de fótons que se chocam com a superfície do satélite, podendo estes ser absorvidos ou refletidos pela mesma. A taxa da quantidade de movimento de todos os fótons incidentes na superfície do satélite origina a força de radiação solar e conseqüentemente o torque de radiação solar.

O modelo matemático deste torque é o seguinte:

$$\vec{N} = \bar{N}_x \vec{i}_g + \bar{N}_y \vec{j}_g + \bar{N}_z \vec{k}_g \quad (2.25)$$

em que:

$$\bar{N}_x = -\frac{\bar{K}}{R^4} (\beta_1 \gamma_1 - \beta_2 \gamma_2) \frac{h}{2} \pi \sigma^2 \{ a_s^2 R_y R_z + a_s r' (R_y a_{31} + R_z a_{21}) + r'^2 a_{21} a_{31} \} \quad (2.26)$$

$$\bar{N}_y = \frac{\bar{K}}{R^4} (\beta_1 \gamma_1 - \beta_2 \gamma_2) \frac{h}{2} \pi \sigma^2 \{ a_s^2 R_x R_z + a_s r' (R_x a_{31} + R_z a_{11}) + r'^2 a_{11} a_{31} \} \quad (2.27)$$

$$\bar{N}_z = 0 \quad (2.28)$$

2.5. Torque Aerodinâmico

Neste trabalho só será estudado o efeito do torque aerodinâmico devido ao arrasto atmosférico. As forças aerodinâmicas são geradas a partir da colisão entre as moléculas de ar rarefeito (alta-atmosfera) com a superfície do satélite. Essa força atua no corpo no chamado centro de pressão (CP) do satélite, o qual está localizado a uma distância me do centro de massa (CM), chamada de margem estática. Quando a margem estática não é nula surge o torque devido à força aerodinâmica.

A força de arrasto (\vec{D}) tem direção e sentido contrário ao da velocidade (\vec{v}) do satélite. O torque devido a esta força é descrito pela seguinte equação (VILHNA de MORAES, 1978):

$$\vec{N}_A = me \times \vec{D} \quad (2.29)$$

A margem estática (me) é considerada fixa para simplificação dos cálculos. Conforme já mencionado logo acima, a direção da força de arrasto (\vec{D}) é oposta a da velocidade orbital e sua magnitude depende da área da seção transversal (S), da velocidade (v) do corpo, do coeficiente de arrasto C_D e da densidade do fluido (ρ_s):

$$D = \frac{1}{2} \rho_s v^2 S C_D \quad (2.30)$$

Sendo desenvolvidos os cálculos como em Sene (2008) chega-se às seguintes equações para as componentes do torque, no sistema principal:

$$\vec{D} = \left\{ \begin{array}{l} -D[a_{11} \cos(\gamma_s) + a_{12} \text{sen}(\gamma_s)] \vec{i} - D[a_{21} \cos(\gamma_s) + a_{22} \text{sen}(\gamma_s)] \vec{j} - \\ D[a_{31} \cos(\gamma_s) + a_{32} \text{sen}(\gamma_s)] \vec{k} \end{array} \right\}, \quad (2.31)$$

ou

$$\vec{D} = D_x \vec{i} + D_y \vec{j} + D_z \vec{k} \quad (2.32)$$

Em que o ângulo (γ_s) é o ângulo formado entre o vetor posição do satélite e o vetor velocidade orbital.

$$N_{Ax} = D_z m e_y - D_y m e_z \quad (2.33)$$

$$N_{Ay} = D_x m e_z - D_z m e_x \quad (2.34)$$

$$N_{Az} = D_y m e_x - D_x m e_y \quad (2.35)$$

3. Ângulo de aspecto solar:

O ângulo de aspecto solar é o ângulo entre o eixo de rotação do satélite e a direção de incidência dos raios solares no mesmo. Este parâmetro é essencial para o bom funcionamento do satélite em órbita, já que da incidência de raios solares depende a geração de energia elétrica para alimentar os equipamentos do satélite. Além disso, o valor desse ângulo deve poder ser controlado, pois, para certa faixa de valores, alguns equipamentos eletrônicos podem, devido a incidência da luz solar, sofrer um aquecimento excessivo, o que poderia causar falhas de funcionamento ou até mesmo, em um caso extremo, a perda de algum equipamento.

O monitoramento e controle deste ângulo tem sido importante para o bom desempenho dos Satélites Brasileiros de Coleta de Dados (SCD1 e SCD2). É importante frisar que cada um destes satélites tem um intervalo do ângulo de aspecto solar considerado adequado para o desempenho do mesmo, de modo a evitar sobreaquecimento de equipamentos.

Nos satélites de Coletas de Dados estudados o ângulo de aspecto solar possui faixas de variação definidas com limites diferentes. Para o SCD1 a faixa de variação segura do ângulo de aspecto solar é entre 60 a 90 graus e para o SCD2 a faixa se torna mais restrita: 80 a 100 graus.

O cálculo do ângulo de aspecto solar pode ser efetuado a partir do produto escalar entre a direção de incidência da luz solar e o vetor unitário do eixo de rotação .

$$\cos(\chi) = \hat{u} \cdot \hat{k} \quad (3.1)$$

$$\hat{u} \cdot \hat{k} = \Gamma =$$

$$\cos(\alpha) \cos(\delta) \cos(\alpha_s) \cos(\delta_s) + \sin(\delta) \sin(\delta_s) + \sin(\alpha) \cos(\delta) \sin(\alpha_s) \cos(\delta_s) \quad (3.2)$$

$$\chi = \arccos(\Gamma) \quad (3.3)$$

Com os dados de ascensão reta (α) e declinação (δ) do eixo de rotação calculados por simulação numérica e o dados de posição do Sol, foi possível calcular o ângulo de aspecto solar, utilizando a fórmula acima, com o auxílio do software Excel para agilizar os cálculos.

Encontrado o ângulo tanto para os dados calculados na teoria como para os fornecidos pelo INPE, foram calculadas as diferenças entre os valores encontrados por ambos e a média dessa diferença.

4. Resultados

Neste tópico serão apresentados e analisados os resultados obtidos nas simulações realizadas para os satélites SCD1 e SCD2. As simulações foram efetuadas por meio de integração numérica das equações diferenciais do movimento rotacional. Inicialmente foram realizadas simulações de 16 dias para ambos os satélites, SCD1 e satélite SCD2, com intervalos de tempo já utilizados em trabalhos anteriores. Depois foram escolhidos outros períodos para a validação da metodologia adotada, sendo que para a escolha dos períodos de integração foram considerados os casos nos quais o parâmetro de Foucault é positivo. Todos os resultados numéricos obtidos são comparados com os dados reais fornecidos pelo INPE para fins de validação da metodologia adotada e do programa computacional utilizado.

Para aprimorar os resultados, parâmetros como o semieixo maior, excentricidade, argumento do perigeu, longitude do nodo ascendente e a inclinação da órbita do satélite, além do momento magnético residual, foram atualizados a cada dia. Também parâmetros de atitude como os ângulos de ascensão reta e declinação tanto do satélite como do sol, o parâmetro de Foucault e a velocidade de rotação do satélite foram substituídos a cada simulação, considerando um intervalo de atualização de 24 horas. Esta abordagem é denominada de atualização diária de dados.

Outro fator importante a se citar é que os satélites em estudo apresentam uma diferença importante relacionada ao controle de atitude, isto é, apenas o SCD2 é equipado com um sistema de controle da velocidade de rotação do satélite, embora ambos possuam uma bobina de torque para o controle de orientação do eixo de rotação. Assim nos dias em que ocorreram manobras de controle de atitude apenas com o SCD2, a simulação é interrompida e reiniciada a partir do dia seguinte, tomando-se como nova condição inicial outro conjunto de valores de atitude, do satélite correspondente, do arquivo de dados fornecido pelo CRC/INPE. Os dados reais fornecidos pelo CRC/INPE para a ascensão reta e declinação do eixo de rotação e para a velocidade de rotação dos satélites SCD1 e SCD2 encontram-se, respectivamente, nas Tabelas A1 e A2 do apêndice A sendo que os períodos de execução de manobras foram destacados em amarelo para melhor observação. No apêndice B encontram-se os valores da ascensão reta e declinação do Sol para o período de simulação considerado para cada satélite.

Também são apresentados os resultados encontrados para o ângulo de aspecto solar.

Para ambos os satélites é especificado que o erro estimado para a velocidade angular não pode ultrapassar 0,5 RPM, enquanto que os erros correspondentes às

estimativas preditas dos ângulos de ascensão reta e declinação não podem passar de 0,5°.

Outro tópico a ser considerado nessa parte do trabalho é a comparação de alguns resultados numéricos com analíticos, a fim de analisa-los.

4.1. Abordagem com atualização de dados para os satélites SCD1 e SCD2

Nesta parte serão abordados comparados os resultados obtidos, em termos dos valores de ascensão reta, declinação e velocidade angular dos satélites em estudo com os valores reais fornecidos pelo CRC/INPE. Com esses valores numéricos será realizado o cálculo do ângulo de aspecto solar e comparado também com os valores reais.

4.1.1. SCD1

Para este satélite foi utilizado um intervalo inicial de 16 dias, entre os dias 18/08/1993 a 02/09/1993, o qual já foi utilizado em trabalhos anteriores. Os resultados estão apresentados na Tabela 1 em termos da ascensão reta e declinação do eixo de rotação, os quais são comparados com os dados do INPE. Para cada uma dessas variáveis também é calculado e apresentado o valor médio correspondente.

Observando a Tabela 1, verifica-se que os valores obtidos nas simulações para a velocidade angular e ângulo de declinação apresentam-se satisfatórios, ou seja, não ultrapassaram os valores limites especificados, citados acima. Porém os valores do ângulo de ascensão reta ultrapassaram o valor limite especificado, em alguns dos dias das simulações. A média dos erros, porém, encontra-se dentro da precisão requerida.

Pelas figuras 1, 2 e 3 observa-se principalmente na ultima delas, valores numéricos extremamente próximos dos reais e nas imagens 1 e 2 uma tendência bastante similar do comportamento das curvas dos dados reais em comparação com a traçada com os valores obtidos pelo programa.

Tabela 1 - Valores dos ângulos de ascensão reta e declinação e da velocidade angular do SCD1, com atualização de dados, em comparação com os valores dos dados reais fornecidos pelo INPE.

Dia	A	$\alpha - \alpha_{inpe}$	Δ	$\delta - \delta_{inpe}$	W	W - W _{inpe}
18/08/1993	280,09	0	81,1	0	87,06	0
19/08/1993	280,163	-0,8475	81,1679	0,3479	86,9009	0,0209
20/08/1993	281,078	-0,6623	80,8875	0,3575	86,7246	0,0146
21/08/1993	281,795	-0,4453	80,5969	0,3669	86,5626	0,0226
22/08/1993	282,286	-0,2844	80,2966	0,3666	86,3973	0,0273

23/08/1993	282,598	-0,1016	79,9959	0,3559	86,2373	0,0273
24/08/1993	282,703	0,0329	79,7048	0,3548	86,0928	0,0528
25/08/1993	282,664	-0,8362	79,4147	0,1947	85,9269	0,0469
26/08/1993	283,48	0,4704	79,2837	0,3337	85,7793	-0,0207
27/08/1993	282,973	0,5432	79,0131	0,3131	85,7082	-0,0218
28/08/1993	282,378	0,6177	78,7626	0,2826	85,6463	-0,0137
29/08/1993	281,928	0,9182	78,506	0,236	85,6028	0,0228
30/08/1993	281,164	0,9843	78,2982	0,2182	85,5295	0,0195
31/08/1993	280,321	1,0314	78,1103	0,2003	85,4657	0,0257
01/09/1993	279,419	1,0788	77,9424	0,1614	85,4018	0,0318
02/09/1993	278,502	1,1418	77,7872	0,1172	85,3324	0,0224
Média		0,227588		0,262925		0,0174

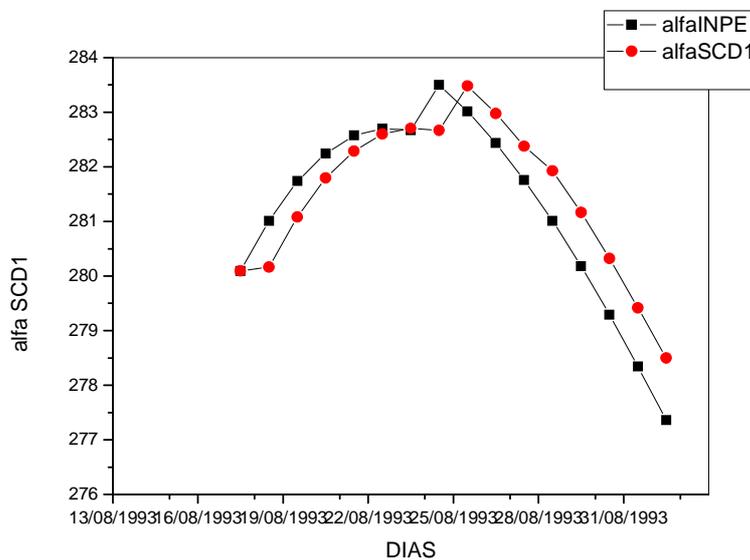


Figura 1 – Comportamento temporal do ângulo de ascensão reta para o SCD1, com atualização diária.

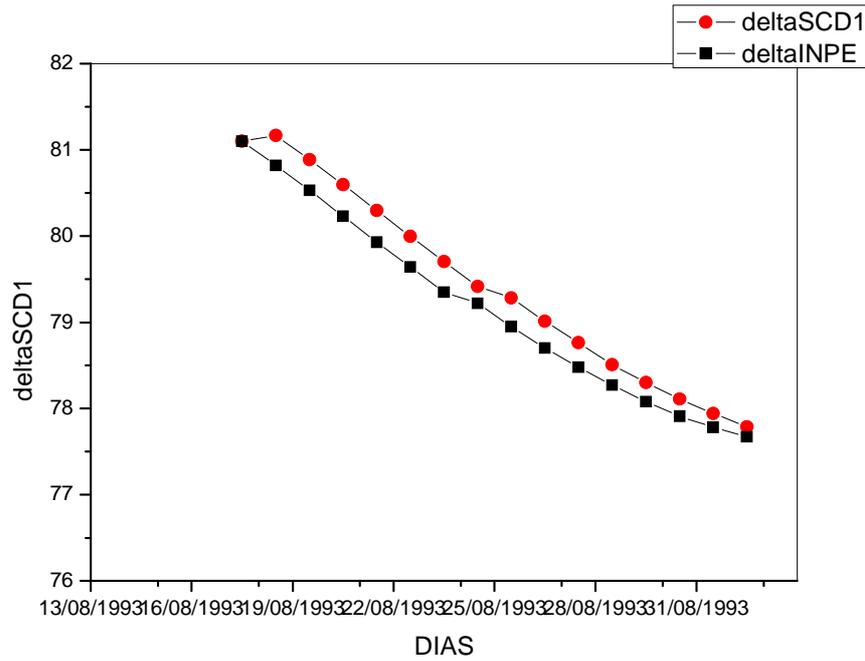


Figura 2 – Comportamento temporal do ângulo de declinação para o SCD1, com atualização diária.

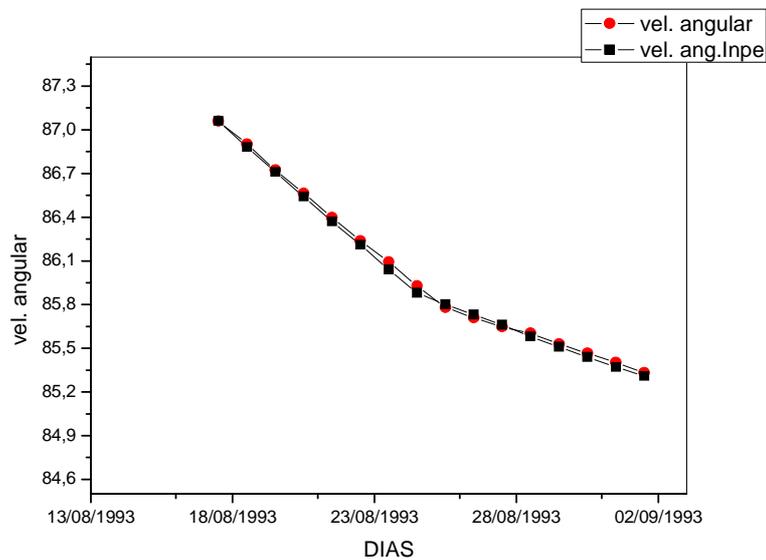


Figura 3 – Comportamento Temporal da velocidade angular para o SCD1, com atualização diária.

Um segundo intervalo de simulação também foi selecionado para um período mais atual de atividades do SCD1, correspondendo à 9/10/2014 – 14/10/2014. Os

resultados encontram-se na Tabela 2. Observa-se que os erros são maiores neste intervalo para os ângulos de atitude, mais isso se justifica pelo satélite encontrar-se na fase final da sua vida útil.

Tabela 2 - Valores dos ângulos de ascensão reta, declinação e da velocidade angular do satélite SCD1, com atualização de dados em comparação com os valores dos dados reais fornecidos pelo INPE.

Dia	$\alpha(^{\circ})$	$\alpha - \alpha_{\text{inpe}}$	$\delta (^{\circ})$	$\delta - \delta_{\text{inpe}}$	W (rpm)	W - W_{inpe}
09/10/2014	268,53	0,00	-36,46	0,00	16,52	0,00
10/10/2014	271,0212	0,52	-36,3038	-1,74	16,49659	0,00
11/10/2014	270,9397	-1,43	-34,4338	-1,45	16,48275	0,01
12/10/2014	272,8035	-1,39	-32,8808	-1,18	16,45292	0,00
13/10/2014	274,6271	-1,35	-31,5929	-0,81	16,43267	0,00
14/10/2014	276,4015	-2,68	-30,7444	1,29	16,41207	0,02
média		-1,06		-0,65		0,005

4.1.2 Ângulo de aspecto solar com os valores do SCD1

O cálculo do ângulo de aspecto solar foi realizado por meio das Eqs. 3.2 e 3.3 para o intervalo de 16 dias, utilizando os resultados com atualização de dados para os ângulos de ascensão reta e declinação do eixo de rotação apresentados na Tabela 1. Para fins de comparação, este ângulo também foi calculado com os valores dos ângulos de ascensão reta e declinação do eixo de rotação fornecido pelo INPE, apresentados na Tabela A1, e aqui representados por χ_{inpe} . A Tabela 3 apresenta os resultados obtidos, com a média dos erros ficando em $-0,1252^{\circ}$, dentro da precisão do INPE.

Também para fins de comparação, na Figura 4 encontram-se os valores do ângulo de aspecto solar calculados na simulação atual e os calculados com os dados do INPE. No entanto, em todos os casos o ângulo de aspecto solar permaneceu dentro da faixa requerida para a missão do SCD1, que é entre 60° e 90° .

A figura 4 mostra a mesma tendência entre os valores obtidos a partir dos dados simulados e os valores reais, obtidos a partir dos valores fornecidos pelo CCS/INPE.

Tabela 3- Valores do ângulo de aspecto solar em comparação com dados do INPE.

Dia	$\chi (^{\circ})$	$\chi (^{\circ})_{\text{inpe}}$	$\chi (^{\circ}) - \chi (^{\circ})_{\text{inpe}}$
18/08/1993	82,94	82,94	0,00
19/08/1993	83,14	83,47	-0,34
20/08/1993	83,64	83,96	-0,32
21/08/1993	84,15	84,45	-0,30
22/08/1993	84,62	84,91	-0,28
23/08/1993	85,07	85,33	-0,25

24/08/1993	85,51	85,73	-0,23
25/08/1993	85,90	86,14	-0,24
26/08/1993	86,31	86,46	-0,14
27/08/1993	86,62	86,73	-0,11
28/08/1993	86,89	86,96	-0,07
29/08/1993	87,17	87,15	0,02
30/08/1993	87,37	87,32	0,05
31/08/1993	87,51	87,43	0,08
01/09/1993	87,64	87,53	0,12
02/09/1993	82,44	82,41	0,03
Média			-0,13

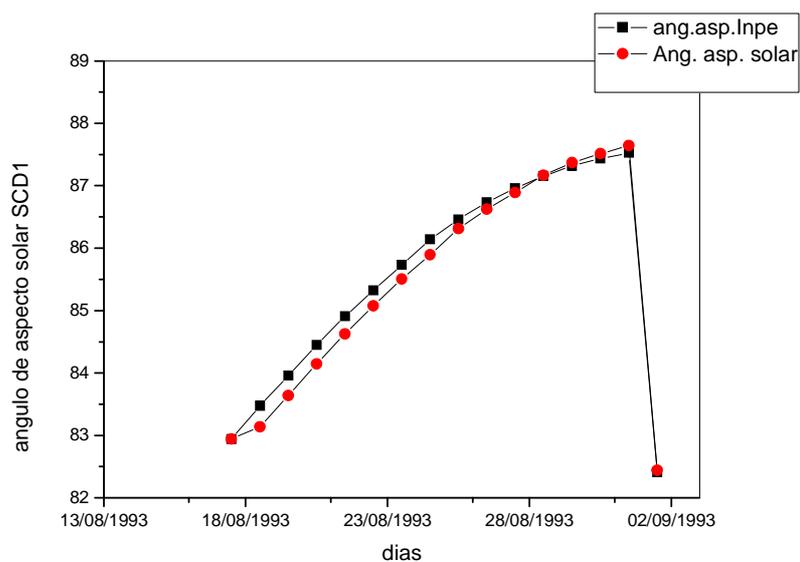


Figura 4 – Valores do ângulo de aspecto solar para o SCD1, com atualização diária.

4.1.3. SCD2

Para o SCD2 foi utilizado um intervalo inicial de simulação de 13 dias, no período de 08/10/2014 até 20/10/2014. A Tabela 4 apresenta os resultados para este intervalo de simulação, sendo que a média do erro da diferença com os dados do INPE não ultrapassou os valores limites especificados, isto é, $0,5^\circ$ para os valores dos ângulos de ascensão reta e declinação e de 0,5 RPM para a velocidade angular.

Nas Figuras 5, 6 e 7 estão apresentados os comportamentos temporais das três variáveis para o período de 13 dias, tanto para as simulações atuais quanto para os dados do INPE.

Tabela 4 - Valores dos ângulos de ascensão reta, declinação e da velocidade angular do SCD2, com atualização de dados em comparação com os dados reais fornecidos pelo INPE.

Dia	$\alpha(^{\circ})$	$\alpha - \alpha_{\text{inpe}}$	$\delta(^{\circ})$	$\delta - \delta_{\text{inpe}}$	W (rpm)	W - W _{inpe}
08/10/2014	284,52	0,00	69,74	0,00	35,72	0,00
09/10/2014	284,46	-0,35	69,84	-0,81	35,71	0,09
10/10/2014	284,78	-0,38	70,01	-0,06	35,61	0,08
11/10/2014	285,16	-0,39	70,15	-0,06	35,53	0,09
12/10/2014	285,58	-0,41	70,28	-0,05	35,44	0,08
13/10/2014	283,49	0,00	71,36	0,00	35,79	0,00
14/10/2014	283,57	-0,45	71,41	-0,02	35,79	0,07
15/10/2014	284,11	-0,46	71,47	-0,01	35,72	0,06
16/10/2014	284,68	-0,43	71,50	0,00	35,66	0,06
17/10/2014	285,22	-0,44	71,51	0,04	35,60	0,05
18/10/2014	285,77	-0,40	71,46	0,04	35,55	0,05
19/10/2014	286,27	-0,39	71,40	0,06	35,50	0,04
20/10/2014	286,12	0,00	72,27	0,00	35,84	0,00
Média		-0,31		-0,07		0,05

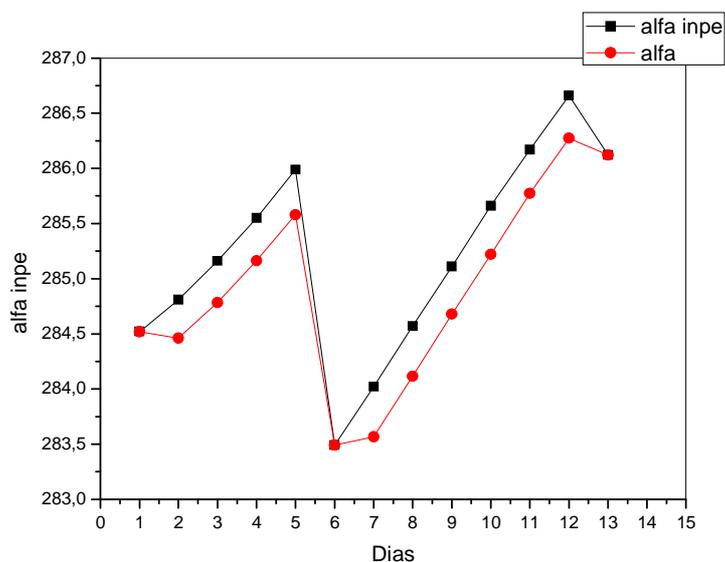


Figura 5 – Comportamento temporal do ângulo de ascensão reta para o SCD2, com atualização diária.

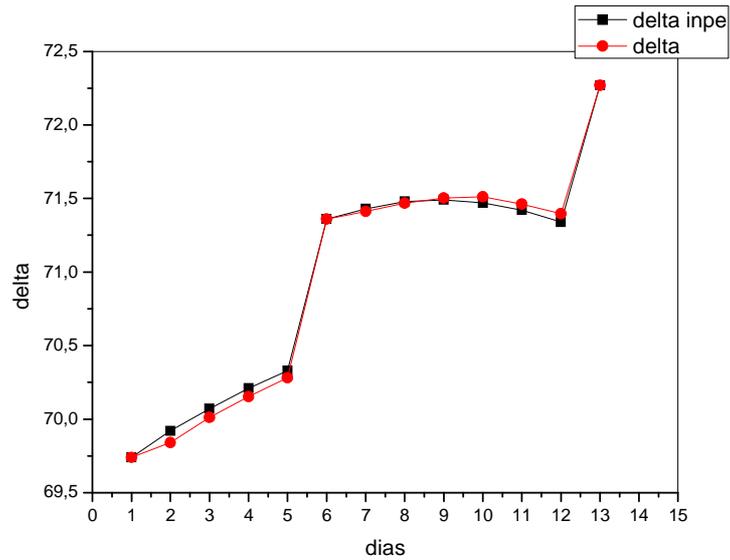


Figura 6 – Comportamento temporal do ângulo de declinação para o SCD2, com atualização diária.

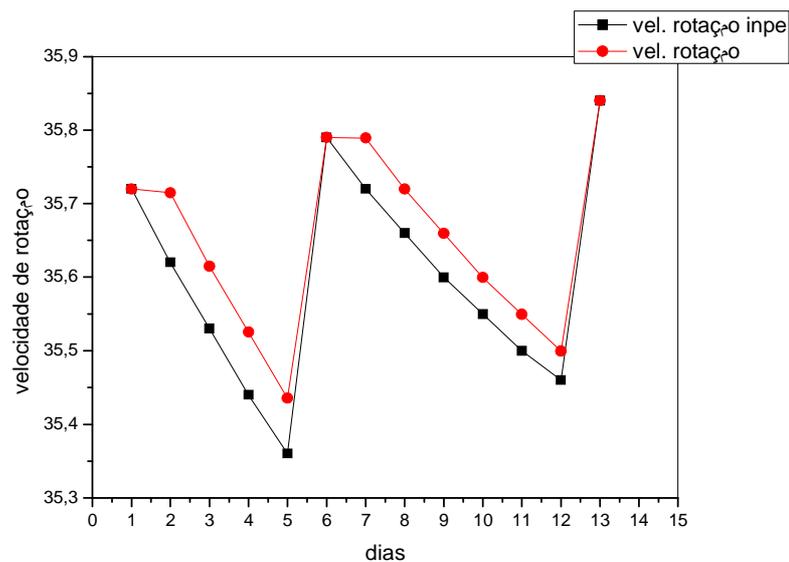


Figura 7 – Comportamento temporal da velocidade angular para o SCD2, com atualização diária.

4.1.4. ÂNGULO DE ASPECTO SOLAR COM OS VALORES DO SCD2

O cálculo do ângulo de aspecto solar foi realizado por meio das Eqs. 3.2 e 3.3 para o intervalo de 13 dias, utilizando os resultados com atualização de dados para os ângulos de ascensão reta e declinação do eixo de rotação apresentados na Tabela 4. Para

fins de comparação, este ângulo também foi calculado com os valores dos ângulos de ascensão reta e declinação do eixo de rotação fornecido pelo INPE, apresentados na Tabela A2, e aqui representados por χ_{inpe} . A Tabela 5 apresenta os resultados obtidos, com a média dos erros ficando em $-0,07^\circ$, dentro da precisão do INPE.

Para fins de comparação, na Figura 8 encontram-se os valores do ângulo de aspecto solar calculados na simulação atual, além dos calculados com os dados do INPE. Observa-se que, em todos os casos, o ângulo de aspecto solar permaneceu dentro da faixa requerida para a missão do SCD2, que é entre 80° e 100° . Somente no primeiro dia o ângulo de aspecto solar atinge o valor de $101,52^\circ$.

A figura 8 mostra a mesma tendência entre os valores obtidos a partir dos dados simulados e os valores reais, obtidos a partir dos valores fornecidos pelo CCS/INPE. As possuem comportamento bastante semelhantes, com resultados muito próximos entre os valores reais e analíticos.

Tabela 5- Valores do ângulo de aspecto solar em comparação com dados do INPE.

Dia	χ ($^\circ$)	χ ($^\circ$)_{inpe}	χ ($^\circ$)-χ ($^\circ$)_{inpe}
08/10/2014	101,52	101,52	0
09/10/2014	87,06	87,2	-0,14
10/10/2014	86,38	86,52	-0,14
11/10/2014	86,09	86,23	-0,14
12/10/2014	85,48	85,62	-0,14
13/10/2014	85,32	85,32	0
14/10/2014	84,74	84,86	-0,12
15/10/2014	84,34	84,44	-0,1
16/10/2014	84,33	84,4	-0,07
17/10/2014	83,96	84,01	-0,05
18/10/2014	83,58	83,61	-0,03
19/10/2014	83,64	83,65	-0,01
20/10/2014	84,1	84,1	0
média			-0,07

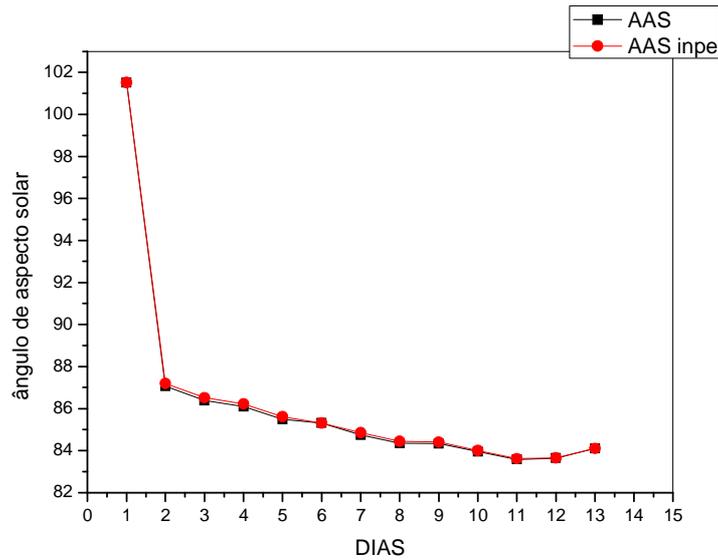


Figura 8 – Valores do ângulo de aspecto solar para SCD2, com atualização diária.

4.2. Comparação das simulações numéricas com os cálculos analíticos

Os resultados obtidos pela simulação numérica com atualização de dados, para os ângulos de ascensão reta e declinação e velocidade angular, para os satélites em estudo foram comparados com os valores calculados de forma analítica em trabalhos submetidos a publicação (ZANARD, et al., 2015). Também é analisado o ângulo de apontamento, definido como o deslocamento do eixo de rotação calculado e o eixo de rotação real (Bento,2010; Zanardi et al.,2012).

4.2.1. SCD1

Para este satélite foi utilizado o mesmo período inicial de integração de 16 dias, no período de 18 de agosto a 9 de setembro de 1993.

Pelas figuras 9, 10 e 11 observamos que o valor numérico se comporta de melhor forma em relação aos dados reais, em comparação com os valores calculados de forma analítica. Também é possível observar que a curva do erro de apontamento (figura 12) para os valores numéricos se comporta de forma mais linear, enquanto que aquela correspondente aos valores calculados pelo método analítico se comporta de forma aleatória, aumentando de intensidade à medida que os dias vão se passando.

Tabela 6 - Valores dos ângulos de ascensão reta para os casos analítico, numérico e real.

DATA	α real	α analítico	α numérico
18/08/1993	280,09	280,09	280,09
19/08/1993	281,01	280,4988	280,1625

20/08/1993	281,74	281,0424	281,0777
21/08/1993	282,24	281,2216	281,7947
22/08/1993	282,57	281,1887	282,2856
23/08/1993	282,7	281,2499	282,5984
24/08/1993	282,67	281,4229	282,7029
25/08/1993	283,5	281,6361	282,6638
26/08/1993	283,01	282,6163	283,4804
27/08/1993	282,43	282,1092	282,9732
28/08/1993	281,76	281,3565	282,3777
29/08/1993	281,01	280,5482	281,9282
30/08/1993	280,18	279,909	281,1643
31/08/1993	279,29	279,4137	280,3214
01/09/1993	278,34	278,9876	279,4188
02/09/1993	277,36	278,2789	278,5018

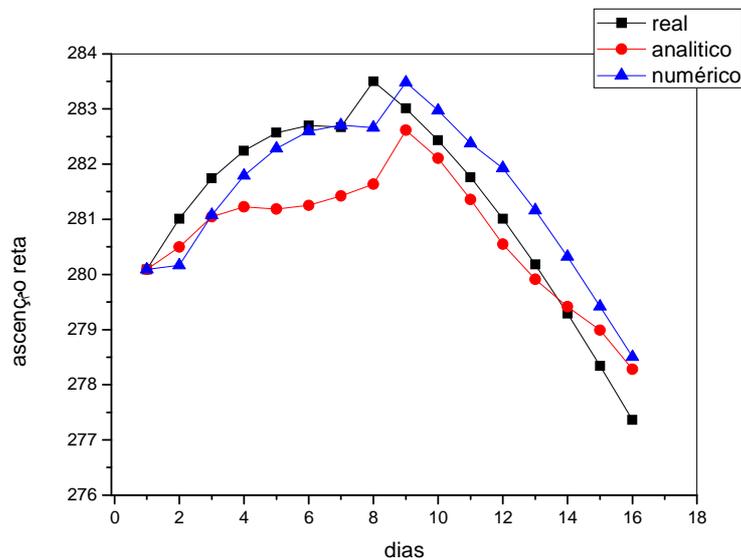


Figura 9 – Variação temporal do ângulo de Ascensão reta numérico, analítico e o real.

Tabela 7 - Valores dos ângulos de declinação para os casos analítico, numérico e real.

DATA	δ real	δ analítico	δ numérico
18/08/1993	81,1	81,1	81,1
19/08/1993	80,82	80,865	81,1679
20/08/1993	80,53	80,6499	80,8875
21/08/1993	80,23	80,4409	80,5969
22/08/1993	79,93	80,1972	80,2966
23/08/1993	79,64	79,8922	79,9959
24/08/1993	79,35	79,5479	79,7048

25/08/1993	79,22	79,2038	79,4147
26/08/1993	78,95	79,0817	79,2837
27/08/1993	78,7	78,9096	79,0131
28/08/1993	78,48	78,8156	78,7626
29/08/1993	78,27	78,7531	78,506
30/08/1993	78,08	78,6388	78,2982
31/08/1993	77,91	78,4778	78,1103
01/09/1993	77,78	78,3057	77,9424
02/09/1993	77,67	78,1916	77,7872

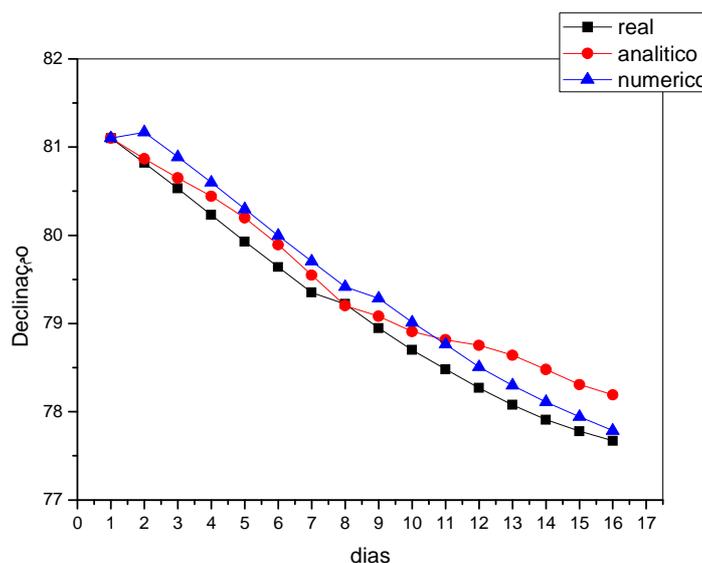


Figura 10- Variação do ângulo de declinação numérico, analítico e o real.

Tabela 8 - Valores da velocidade de rotação para os casos de analítico, numérico e real.

DATA	Wreal	W analico	W numérico
18/08/1993	87,06	87,06	87,06
19/08/1993	86,88	86,3086	86,9009
20/08/1993	86,71	86,2542	86,7246
21/08/1993	86,54	86,4675	86,5626
22/08/1993	86,37	86,7611	86,3973
23/08/1993	86,21	86,6455	86,2373
24/08/1993	86,04	86,0492	86,0928
25/08/1993	85,88	85,4699	85,9269
26/08/1993	85,8	85,2744	85,7793
27/08/1993	85,73	85,316	85,7082
28/08/1993	85,66	85,3039	85,6463

29/08/1993	85,58	85,2859	85,6028
30/08/1993	85,51	85,3202	85,5295
31/08/1993	85,44	85,3761	85,4657
01/09/1993	85,37	85,4099	85,4018
02/09/1993	85,31	85,4423	85,3324

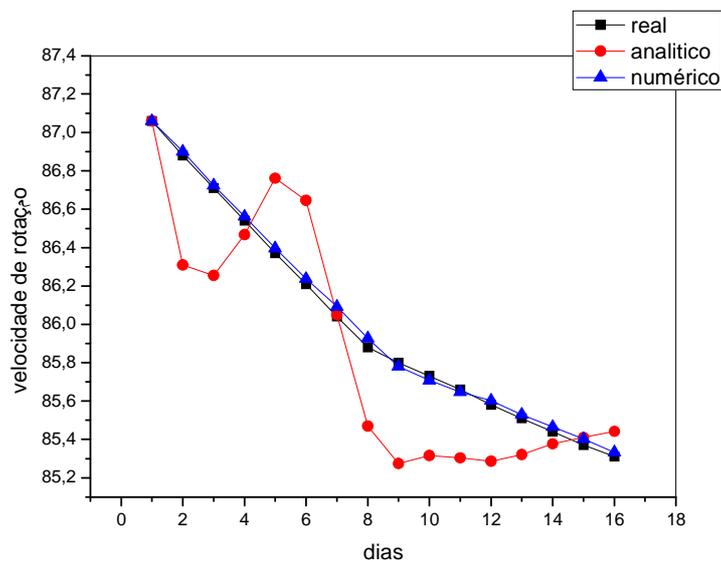


Figura 11- Variação temporal da velocidade de rotação numérico, analítico e real.

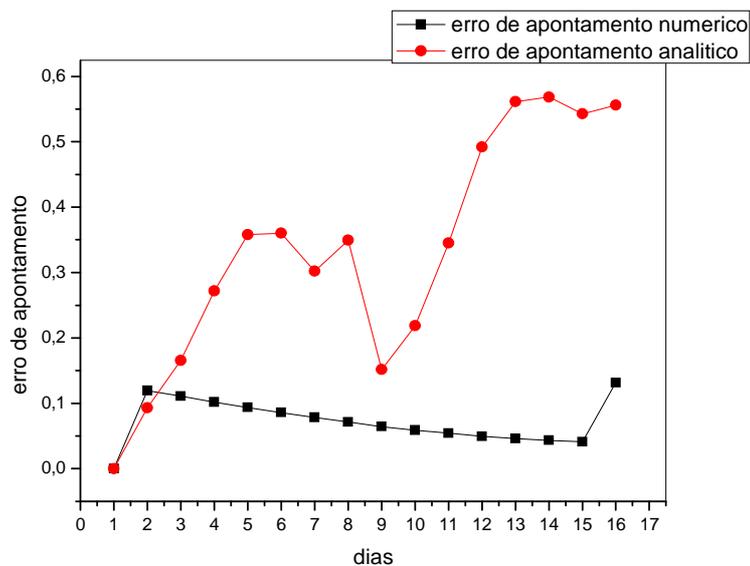


Figura 12- Variação temporal do erro de apontamento numérico e analítico.

4.2.2. SCD2

Para o satélite SCD2 o intervalo escolhido foi de 16 dias no período de 12 a 27 de fevereiro de 2002, já utilizado em trabalhos anteriores.

Pelas figuras 13, 14, 15, assim como observado para o satélite SCD1, os valores obtidos pela forma numérica são mais próximos aos reais do que aqueles calculados analiticamente.

O erro de apontamento, figura 16, segue uma ordem linear, enquanto que o erro dos valores analíticos não tem um comportamento linear. Apenas um ponto destoa bastante em ambos os métodos para o erro de apontamento.

Tabela 9 - Valores dos ângulos de ascensão reta para os casos analítico, numérico e real.

DATA	α real	α analítico	α numerico
12/02/2002	278,71	278,71	278,71
13/02/2002	278,73	278,9508	278,7106
14/02/2002	278,74	279,0067	278,7189
15/02/2002	278,74	279,0423	278,7121
16/02/2002	278,72	279,0259	278,6913
17/02/2002	278,68	278,9301	278,6474
18/02/2002	278,63	278,7978	278,3387
19/02/2002	278,57	278,6839	278,2883
20/02/2002	278,5	278,6116	278,2274
21/02/2002	278,42	278,5496	278,325
22/02/2002	278,33	278,4847	278,2495
23/02/2002	278,23	278,3874	278,1648
24/02/2002	276,6	276,6	276,6
25/02/2002	276,42	276,5579	276,3747
26/02/2002	276,2	276,3659	276,1639
27/02/2002	275,94	276,1355	275,954

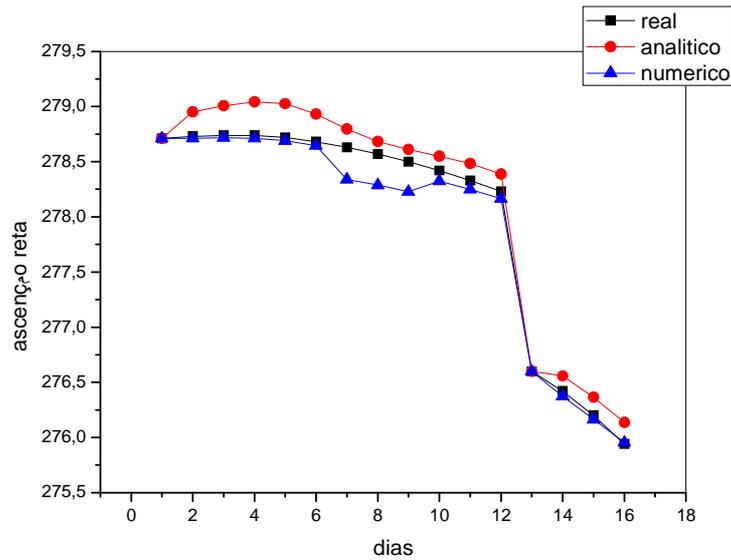


Figura 13 – Variação temporal do ângulo de ascensão reta numérico, analítico e o valor real.

Tabela 10 - Valores dos ângulos de declinação para os casos analítico, numérico e real.

DATA	δ real	δ analítico	δ numérico
12/02/2002	63,47	63,47	63,47
13/02/2002	63,5146	63,4907	63,4673
14/02/2002	63,4636	63,4161	63,43
15/02/2002	63,409	63,3135	63,3835
16/02/2002	63,357	63,2279	63,3386
17/02/2002	63,316	63,1663	63,295
18/02/2002	63,2964	63,137	63,4179
19/02/2002	63,2926	63,1271	63,3983
20/02/2002	63,3014	63,1024	63,3769
21/02/2002	63,317	63,0622	63,1689
22/02/2002	63,3421	63,0064	63,1496
23/02/2002	63,359	62,9551	63,1402
24/02/2002	61,22	61,22	61,22
25/02/2002	61,1443	60,8735	61,1115
26/02/2002	60,9304	60,6671	60,9197
27/02/2002	60,7028	60,4546	60,7184

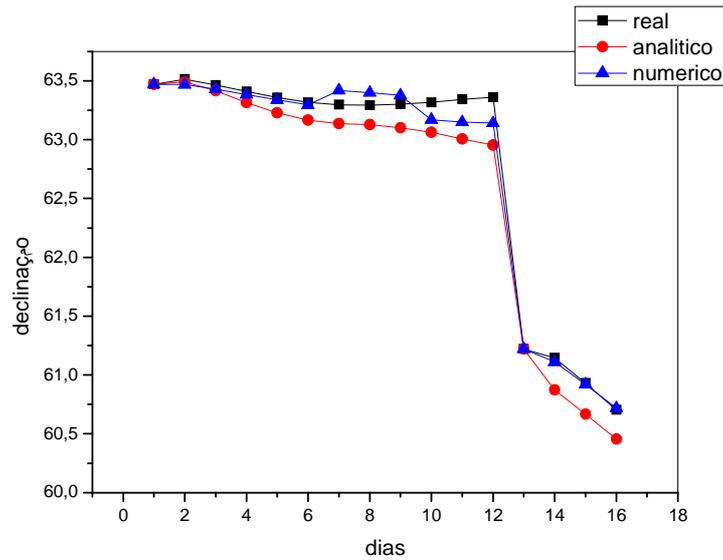


Figura 14- Variação temporal do ângulo de declinação numérico, analítico e real.

Tabela 11 - Valores da velocidade de rotação para os casos analítico, numérico e real.

DATA	Wreal	W analítico	W numérico
12/02/2002	34,48	34,48	34,48
13/02/2002	34,42	34,5036	34,4316
14/02/2002	34,37	34,3435	34,3695
15/02/2002	34,31	34,2196	34,3173
16/02/2002	34,26	34,1273	34,256
17/02/2002	34,2	34,0573	34,2042
18/02/2002	34,14	33,9822	34,1433
19/02/2002	34,08	33,9219	34,083
20/02/2002	34,02	33,8874	34,0241
21/02/2002	33,96	33,8631	33,9614
22/02/2002	33,9	33,8961	33,9045
23/02/2002	33,83	33,886	33,8479
24/02/2002	33,69	33,69	33,69
25/02/2002	33,69	33,7281	33,6417
26/02/2002	33,55	33,5985	33,643
27/02/2002	33,48	33,4145	33,5101

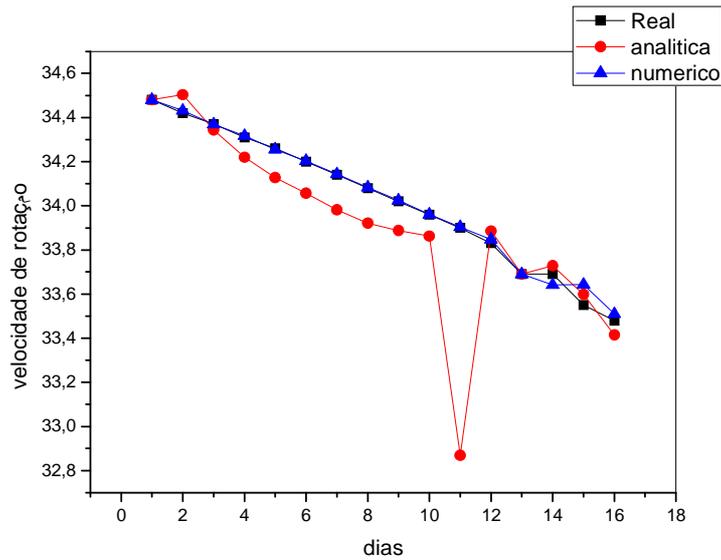


Figura15- Variação temporal da velocidade de rotação numérica, analítica e real.

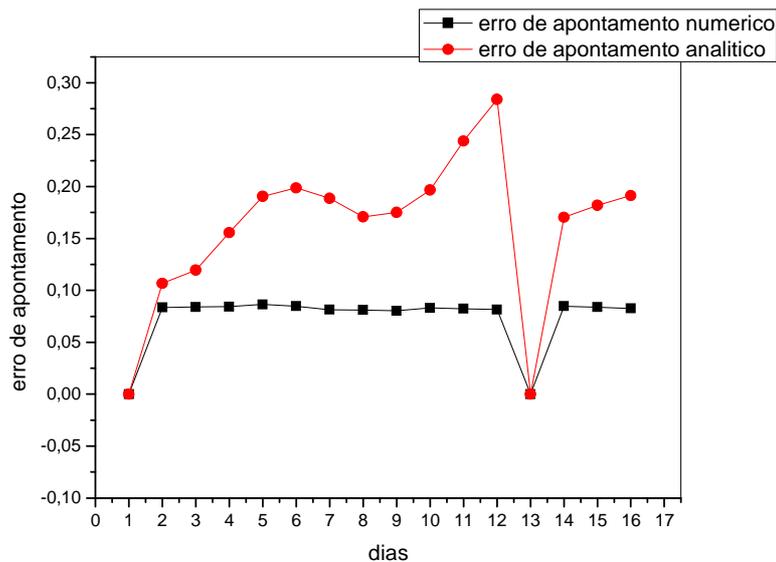


Figura 16- Variação temporal do erro de apontamento numérico e analítico.

5. Conclusão

Neste trabalho foi analisada a influência de torques externos na atitude de satélites artificiais, com aplicações para satélites estabilizados por rotação. Os resultados obtidos nas simulações foram comparados com os valores da velocidade de rotação e dos ângulos de ascensão reta e declinação do eixo de rotação e do ângulo de aspecto solar fornecidos pelo CRC/INPE. Saliente-se que o programa numérico desenvolvido é muito extenso devido à inclusão de cinco torques externos atuantes

(torque de gradiente de gravidade, torque aerodinâmico, torque elétrico, torque magnético induzido, torque de radiação solar) e que os cálculos do ângulo de aspecto solar envolvem transformações de muitas variáveis.

Na abordagem, com atualização diária de dados, os resultados apresentados para o SCD1 mostraram-se satisfatórios para todas as três variáveis no primeiro período. Apesar de que, em algumas datas, as diferenças terem sido maiores do que a máxima especificada pelo INPE, a média para todos os resultados ficou sempre abaixo dos valores limites especificados para a missão. No entanto no período correspondente ao final da vida útil do satélite, os erros nos ângulos de atitude foram maiores. Para o SCD2, os resultados também foram bastante favoráveis com a média da diferença sendo menor que a requerida pelo INPE. Os resultados para o ângulo de aspecto solar para esta abordagem também foram bastante satisfatórios e permaneceram na faixa de tolerância.

Na comparação com os valores analíticos também foi constatado que os resultados calculados por integração numérica apresentaram melhores linhas de tendências e valores mais próximos dos valores reais, que os valores calculados de forma analítica, mesmo que esses estejam dentro da faixa de erro permitida.

Saliente se que com o conjunto de dados fornecidos pelo CRC/INPE para toda a vida dos satélites SCD1 e SCD2, desde os lançamentos até o presente, torna se interessante a avaliação de outros intervalos de simulação, para reforçar a validação da abordagem aqui realizada.

Os resultados deste projeto foram submetidos à publicação em revista indexada, estando aguardando o parecer final.

6. Bibliografia

- BATE, R. R.; MUELLER, D. D.; WHITE, E. W. **Fundamentals of astrodynamics**. Ed. Dover Publications, INC, 1971.
- BENTO, P. R. S. P., **Propagação da Atitude de Satélites Artificiais com Quatérnions e Torque Devido à Força de Lorentz**, Relatório Final de Bolsa de Iniciação Científica do CNPq/INPE, INPE library on-line INPE, São José dos Campos, 2010.
- CARVALHO, M. V. **Propagação Numérica da Atitude de Satélites Artificiais Estabilizados por Rotação, com Uso de Quatérnions, Analisando a Influência Torques Externos**. Relatório Final de Bolsa de Iniciação Científica do CNPq/INPE, INPE, São José dos Campos, 2013.
- ISHIBASHI, L., ORLANDO, V., ZANARDI, M. C. **Torque de Radiação Solar Direta e a predição da atitude de Veículos Espaciais com Quatérnions**. Anais do VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, p. 1 -8, São Luis do Maranhão, 2012.
- KUGA, H. K.; FERREIRA, L. D. D. ; GUEDES, U. T. V. **Simulação de atitude e de manobras para o satélite brasileiro estabilizado por rotação**, Relatório Técnico do INPE, INPE-4271-PRE/1143.1987a.
- KUGA, H. K.; SILVA, W. C. C.; GUEDES, U. T. V. **Dinâmica de atitude para satélites estabilizados por rotação**, Relatório Técnico do INPE, INPE-4403-NTE/275, 1987b.
- KUGA, H. K. ; ORLANDO, V.; LOPES, R. V. F. Flight dynamics operations during leap for the inpe's second enviromental data collecting satellite SCD2, **RBCM – J. of the Braz. Soc. Mechanical Sciences**, Vol. XXI – Special Issue, pp 339 – 344, 1999.
- MOORE, R. C.; PISACANE V. L. **Fundamentals of space systems**. New York: Oxford University Press, 1994.
- MOTTA, G.B.; Prediação analítica da atitude de satélites estabilizados por rotação, Dissertação de mestrado, UNESP, Campus de Guaratinguetá, 2014.
- ORLANDO, V.; LOPES, R. V. F.; KUGA, H. K. INPE'S flight dynamics team experience trough four years of scd1 in-orbit operations: main issues, improvements and tends, **Proceeding of ESA International Symposium on Spaceflight Dynamics**, Darmstadt, Alemanha, pp. 433-437,1997.
- ORLANDO, V. “Controle de Satélite no INPE”, UNESP, **Apostila da 13ª Escola de Verão em Dinâmica Orbital e Planetologia**, Guaratinguetá, SP, pp.177-195, 2009.
- PELOSI, T. **Propagação Numérica da Atitude de Satélites Artificiais com Quatérnions e Torques Externos**, São José dos Campos, 2014.

WERTZ, J.R. **Spacecraft Attitude Determination and Control**. London, Reidel, vol. 73, 1978.

ZANARDI, M. C., BENTO, P. R. S. P., ORLANDO, V. **Predição da Orientação Espacial de Satélites artificiais com Quatérnions e Torques Ambientais**. Anais do CONEM 2010 - Engenharia para Todos. Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande, 2010. v.1. p.1 – 10.

ZANARDI, M. C., ORLANDO, V., BENTO, P. R. S., SILVA, M. F. **Spin stabilized satellite's attitude propagation with quatérnions**. Journal of Aerospace Engineering, Sciences and Applications. , v. IV, p.41 - 53, 2012.

APÊNDICE A

Tabela A1 – Dados do satélite SCD1 fornecidas pelo CCS/INPE, sendo α - ascensão reta do eixo de rotação, δ - declinação do eixo de rotação do satélite e W-velocidade de rotação.

Dia-SCD1	α_{INPE} (°)	δ_{INPE} (°)	W_{INPE} (rpm)
24/7/1993	234,1000	77,3000	90,8100
25/7/1993	233,7400	77,6900	90,7100
26/7/1993	233,5400	78,0900	90,6200
27/7/1993	233,5300	78,5000	90,5200
28/7/1993	233,7300	78,9300	90,4200
29/7/1993	234,1400	79,3500	90,3300
30/7/1993	234,8300	79,7800	90,2300
31/7/1993	235,8000	80,2000	90,1200
1/8/1993	237,1200	80,6000	90,0200
2/8/1993	238,8200	80,9900	89,9100
3/8/1993	240,8900	81,3400	89,8100
4/8/1993	244,0400	81,8600	89,5400
5/8/1993	246,6200	82,1200	89,3500
6/8/1993	249,5300	82,3300	89,1600
7/8/1993	252,7400	82,4800	88,9700
8/8/1993	256,1500	82,5800	88,7900
9/8/1993	259,7000	82,6000	88,5900
10/8/1993	263,2000	82,5600	88,4100
11/8/1993	266,5500	82,4400	88,2200
12/8/1993	269,7000	82,2800	88,0300
13/8/1993	272,5400	82,0600	87,8500

14/8/1993	275,7500	81,8500	87,6100
15/8/1993	277,4500	81,6200	87,4200
16/8/1993	278,9000	81,3700	87,2400
17/8/1993	280,0900	81,1000	87,0600
18/8/1993	281,0100	80,8200	86,8800
19/8/1993	281,7400	80,5300	86,7100
20/8/1993	282,2400	80,2300	86,5400
21/8/1993	282,5700	79,9300	86,3700
22/8/1993	282,7000	79,6400	86,2100
23/8/1993	282,6700	79,3500	86,0400
24/8/1993	283,5000	79,2200	85,8800
25/8/1993	283,0100	78,9500	85,8000
26/8/1993	282,4300	78,7000	85,7300
27/8/1993	281,7600	78,4800	85,6600
28/8/1993	281,0100	78,2700	85,5800
29/8/1993	280,1800	78,0800	85,5100
30/8/1993	279,2900	77,9100	85,4400
31/8/1993	278,3400	77,7800	85,3700
1/9/1993	277,3600	77,6700	85,3100

Dia-SCD1	αinpe (°)	δ inpe (°)	Winpe (rpm)
09/10/2014	268,53	-36,46	16,52
10/10/2014	270,50	-34,56	16,50
11/10/2014	272,37	-32,98	16,47
12/10/2014	274,19	-31,70	16,45

13/10/2014	275,98	-30,78	16,43
14/10/2014	279,08	-32,03	16,39

Tabela A2 – Dados do satélite SCD2 fornecidas pelo CCS/INPE, sendo que os dias destacados representam a ocorrência de controle de atitude.

Dia	α_{INPE} (°)	δ_{INPE} (°)	W_{INPE} (rpm)
08/10/2014	284,52	69,74	35,72
09/10/2014	284,81	69,92	35,62
10/10/2014	285,16	70,07	35,53
11/10/2014	285,55	70,21	35,44
12/10/2014	285,99	70,33	35,36
13/10/2014	283,49	71,36	35,79
14/10/2014	284,02	71,43	35,72
15/10/2014	284,57	71,48	35,66
16/10/2014	285,11	71,49	35,6
17/10/2014	285,66	71,47	35,55
18/10/2014	286,17	71,42	35,5
19/10/2014	286,66	71,34	35,46
20/10/2014	286,12	72,27	35,84

APÊNDICE B

ASCENSÃO RETA E DECLINAÇÃO DO SOL

Tabela B1 – Ascensão reta e declinação do sol para o período de simulação do SCD1

Dia	Ascensão Retra do Sol (°)	Declinação do Sol (°)

24/7/1993	124,35	19,70
25/7/1993	125,33	19,48
26/7/1993	126,30	19,25
27/7/1993	127,30	19,03
28/7/1993	128,28	18,80
29/7/1993	129,25	18,57
30/7/1993	130,23	18,32
31/7/1993	131,20	18,07
1/8/1993	132,18	17,82
2/8/1993	133,13	17,55
3/8/1993	134,10	17,30
4/8/1993	135,05	17,03
5/8/1993	136,03	16,75
6/8/1993	136,98	16,48
7/8/1993	137,93	16,20
8/8/1993	138,88	15,92
9/8/1993	139,83	15,62
10/8/1993	140,78	15,33
11/8/1993	141,73	15,03
12/8/1993	142,68	14,73
13/8/1993	143,60	14,43
14/8/1993	144,55	14,12
15/8/1993	145,48	13,80
16/8/1993	146,43	13,48
17/8/1993	147,35	13,17
18/8/1993	148,28	12,83

19/8/1993	149,20	12,52
20/8/1993	150,13	12,18
21/8/1993	151,05	11,85
22/8/1993	151,98	11,52
23/8/1993	152,90	11,17
24/8/1993	153,83	10,83
25/8/1993	154,73	10,48
26/8/1993	155,65	10,13
27/8/1993	156,58	9,78
28/8/1993	157,48	9,43
29/8/1993	158,38	9,07
30/8/1993	159,30	8,72
31/8/1993	160,20	8,35

Dia	Ascensão Reta do Sol(°)	Declinação do Sol(°)
09/10/2014	1301,3	-6,32
10/10/2014	1304,9	-6,55
11/10/2014	1308,6	-7,17
12/10/2014	1312,3	-7,4
13/10/2014	1316	-8,02
14/10/2014	1319,7	-8,24

Tabela B2 – Ascensão reta e declinação do sol para o período de simulação do SCD2

Dia	Ascensão Reta do Sol(°)	Declinação do Sol(°)

08/10/2014	1257,6	-6,09
09/10/2014	1301,3	-6,32
10/10/2014	1304,9	-6,55
11/10/2014	1308,6	-7,17
12/10/2014	1312,3	-7,40
13/10/2014	1316,0	-8,02
14/10/2014	1319,7	-8,24
15/10/2014	1323,4	-8,47
16/10/2014	1327,2	-9,09
17/10/2014	1330,9	-9,30
18/10/2014	1334,7	-9,52
19/10/2014	1338,4	-10,14
20/10/2014	1342,2	-10,35