



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

# **Propagação Numérica da Atitude de Satélites Artificiais 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](mailto:tatiane_pelosi@hotmail.com)

Dr. Valcir Orlando (CCS/INPE, Orientador)

E-mail: [valcir@ccs.inpe.br](mailto:valcir@ccs.inpe.br)

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

E-mail: [mceciliazanardi@gmail.com](mailto:mceciliazanardi@gmail.com)

Julho de 2014

## **AGRADECIMENTOS**

A meus familiares que sempre me deram apoio, aos meus professores, principalmente a Professora Dr<sup>a</sup>. 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 escritas em termos das componentes da velocidade de rotação e dos quatérnions, incluindo simultaneamente os torques aerodinâmico, gradiente de gravidade, elétrico, 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. Os resultados são apresentados em termos dos ângulos de ascensão reta e declinação do eixo de rotação do satélite e da magnitude da velocidade de rotação. Com o intuito de obter resultados mais precisos que os encontrados em trabalhos anteriores foi considerada a atualização diária na simulação parâmetros que antes eram considerados constantes. Com os dados obtidos pelas simulações numéricas foi possível calcular o ângulo de aspecto solar, utilizando o software EXCEL para ambos os satélites citados a cima.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Comportamento temporal do ângulo de ascensão reta para o satélite SCD1, com atualização diária.....	24
Figura 2 – Comportamento temporal do ângulo de declinação para o satélite SCD1, com atualização diária.....	25
Figura 3 – Comportamento temporal do ângulo de ascensão reta para o satélite SCD1, com atualização diária.....	25
Figura 4 – Gráfico dos valores do ângulo de aspecto solar para o satélite SCD1, com atualização diária.....	28
Figura 5 – Comportamento temporal do ângulo de ascensão reta.....	33
Figura 6 – Comportamento temporal do ângulo de declinação para o satélite SCD2 com atualização diária.....	33
Figura 7 – Comportamento temporal do ângulo de ascensão reta para o satélite SCD2 com atualização diária.....	34
Figura 8- Comportamento temporal do ângulo de aspecto solar para o satélite SCD2, com atualização diária.....	38

## 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.....	20
Tabela 2 - Comparação da ascensão reta com resultado de Carvalho (2013).....	21
Tabela 3 - Comparação da declinação com resultado de Carvalho (2013).....	22
Tabela 4 - Comparação da velocidade angular com resultado de Carvalho (2013).....	23
Tabela 5 - Comparação das médias do erro.....	24
Tabela 6 - Valores do ângulo de aspecto solar em comparação com os valores do INPE.....	26
Tabela 7 - Valores do ângulo de aspecto solar em comparação com os resultados de Carvalho (2013).....	27
Tabela 8 - 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.....	29
Tabela 9 - Valores do ângulo de ascensão reta para o SCD2 com atualização de dados em comparação com Carvalho (2013).....	31
Tabela 10 - Valores do ângulo da declinação para o SCD2 com atualização de dados em comparação com Carvalho (2013).....	31
Tabela 11 - Valores da velocidade angular para o SCD2 com atualização de dados em comparação com Carvalho (2013).....	32

Tabela 12 - Comparação das médias do erro.....	32
Tabela 13 - Valores do ângulo de aspecto solar em comparação com os valores do INPE.....	35
Tabela 14 - Valores do ângulo de aspecto solar em comparação com os resultados de Carvalho (2013).....	36
Tabela 15 - Valores do ângulo de ascensão reta, declinação e velocidade angular do satélite SCD1 sem atualização, de dados em comparação com os valores fornecidos pelo INPE.....	39
Tabela 16 - Valores do ângulo de ascensão reta, declinação e velocidade angular do satélite SCD1, sem atualização de dados em comparação com os valores fornecidos pelo INPE .....	39
Tabela 17 - Valores do ângulo de ascensão reta e declinação do satélite SCD1 sem atualização de dados em comparação a Carvalho (2013).....	39
Tabela 18 – Valores da velocidade angular do satélite SCD1 sem atualização de dados em comparação a Carvalho (2013).....	40
Tabela 19 - Valores do ângulo de ascensão reta e declinação do satélite SCD1 sem atualização de dados em comparação a Carvalho (2013).....	40
Tabela 20 - Valores da velocidade angular do satélite SCD1 sem atualização de dados em comparação a Carvalho (2013).....	40
Tabela 21 - Valores do ângulo de aspecto solar em comparação com os valores do INPE.....	41
Tabela 22 - Valores do ângulo de aspecto solar em comparação com os valores do INPE.....	41

Tabela 23 - Valores do ângulo de aspecto solar em comparação com os valores do trabalho de Carvalho (2013).....	42
Tabela 24 - Valores do ângulo de aspecto solar em comparação com o trabalho de Carvalho (2013).....	42
Tabela 25 - Valores do ângulo de ascensão reta, declinação e velocidade angular do satélite SCD2 sem atualização de dados em comparação com os valores fornecidos pelo INPE.....	43
Tabela 26 - Valores do ângulo de ascensão reta, declinação e velocidade angular do satélite SCD2, sem atualização de dados em comparação com os valores fornecidos pelo INPE.....	43
Tabela 27 - Valores do ângulo de ascensão reta e declinação do satélite SCD2 sem atualização de dados, em comparação a Carvalho (2013), para o primeiro intervalo.....	43
Tabela 28 - Valores da velocidade angular do satélite SCD2 sem atualização de dados em comparação a Carvalho (2013), para o primeiro intervalo.....	44
Tabela 29 - Valores do ângulo de ascensão reta e declinação do satélite SCD2 sem atualização de dados em comparação a Carvalho (2013), para o segundo intervalo.....	44
Tabela 30 - Valores da velocidade angular do satélite SCD2 sem atualização de dados em comparação a Carvalho (2013), para o segundo intervalo.....	44
Tabela 31 - Valores do ângulo de aspecto solar em comparação com os valores do INPE.....	45
Tabela 32 - Valores do ângulo de aspecto solar em comparação com os valores do INPE.....	45

Tabela 33 - Valores do ângulo de aspecto solar em comparação com os valores calculados com os resultados fornecidos pelo trabalho de Carvalho (2013).....	46
Tabela 34 - Valores do ângulo de aspecto solar em comparação com os valores calculados com os resultados fornecidos pelo trabalho de Carvalho (2013).....	46
Tabela A1 – Dados do satélite SCD1 fornecidas pelo CRC/INPE.....	51
Tabela A2 – Dados do satélite SCD2 fornecidas pelo CRC/INPE.....	53
Tabela B1 – Ascensão reta e declinação do sol para o período de simulação do SCD1.....	55
Tabela B2 – Ascensão reta e declinação do sol para o período de simulação do SCD2.....	57



## 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
$\alpha$	- ascensão reta do eixo de rotação
$\delta$	- declinação do eixo de rotação
$\mu_0$	- permeabilidade do espaço livre
$\hat{k}_m$	- vetor unitário que descreve a direção do momento geomagnético
$\beta$	- inclinação do vetor de dipolo em relação ao eixo equatorial OZ
$\eta$	- argumento do nodo ascendente do equador geomagnético
$\phi$	- ângulo de rotação
$\Omega$	- longitude do nodo ascendente
$\chi$	- ângulo de aspecto solar

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>12</b>
<b>2. DESENVOLVIMENTO.....</b>	<b>12</b>
<b>2.1. Torque elétrico.....</b>	<b>13</b>
<b>2.2. Torque magnéticos.....</b>	<b>14</b>
<b>2.2.1. Torque devidos a momentos magnéticos do satélite.....</b>	<b>14</b>
<b>2.2.2. Torque devido a corrente de Foucault.....</b>	<b>15</b>
<b>2.3. Torque de gradiente de gravidade.....</b>	<b>15</b>
<b>2.4. Torque de radiação solar.....</b>	<b>16</b>
<b>2.5. Torque aerodinâmico .....</b>	<b>17</b>
<b>3. ÂNGULO DE ASPECTO SOLAR.....</b>	<b>18</b>
<b>4. RESULTADOS.....</b>	<b>19</b>
<b>4.1. Abordagem 1. Com atualização de dados.....</b>	<b>19</b>
<b>4.1.1. SCD1.....</b>	<b>20</b>
<b>4.1.2. Ângulo de aspecto solar com valores do SCD1.....</b>	<b>26</b>
<b>4.1.3. SCD2.....</b>	<b>28</b>
<b>4.1.4. Ângulo de aspecto solar com valores do SCD2.....</b>	<b>34</b>
<b>4.2. Abordagem 2. Sem atualização de dados.....</b>	<b>38</b>
<b>4.2.1. SCD1.....</b>	<b>38</b>
<b>4.2.2. Ângulo de aspecto solar com dados do SCD1.....</b>	<b>41</b>
<b>4.2.3. SCD2.....</b>	<b>42</b>
<b>4.2.4. Ângulo de aspecto solar com dados SCD2.....</b>	<b>45</b>
<b>5. CONCLUSÃO.....</b>	<b>47</b>
<b>6. BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>49</b>
<b>APÊNDICE A.....</b>	<b>51</b>
<b>APÊNDICE B.....</b>	<b>55</b>

## 1.Introdução

Este estudo é focado na análise dinâmica da atitude de satélites artificiais estabilizados por rotação. Esses corpos sofrem, no espaço, a interferência de torques externos, sendo os mais importantes deles os seguintes: 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 já desenvolvidos, salientando os diferentes parâmetros relacionados com cada um deles.

A propagação numérica das equações do movimento de atitude, às quais foram incluídos os modelos de cada torque considerado, será realizada com auxílio do método de Runge-Kutta implementado com auxílio da linguagem de programação FORTRAN. Considera-se as equações do movimento descritas em termos de quatérnions e das componentes da velocidade de rotação. Na segunda fase do projeto, as simulações numéricas são realizadas utilizando um conjunto de dados dos Satélites Brasileiros de Coleta de Dados - SCD1 e SCD2, fornecidos pelo INPE.

## 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:

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

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

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

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

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

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

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

onde:  $I_x$ ,  $I_y$  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 principal, também chamado de 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 maneira mais compacta:

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

Em seguida será apresentada uma breve introdução dos torques externos que serão considerados neste estudo.

## 2.1. Torque Elétrico ou Devido á Força de Lorentz

Este torque é 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 a qual, caso ultrapasse o limite de ruptura, gera uma descarga eletrostática que produz um movimento de precessão e até um deslocamento do satélite em orbita. São parâmetros deste torque a velocidade de rotação do satélite, a velocidade de rotação diurna do campo geomagnético e a da Terra e a inercia da blindagem de proteção, que é o parâmetro físico que define a carga elétrica do satélite.

O modelo matemático deste toque, desenvolvido por SEHNAL, 1969, é o seguinte:

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

Na expressão acima:  $Q$  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

Estes toques são resultantes da interação entre o campo magnético do satélite e o campo geomagnético. Neste trabalho serão considerados 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

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

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

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

Em que:  $B_x$ ,  $B_y$  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 de perfil exponencial da velocidade de rotação do veículo. Este torque é descrito como:

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

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:

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

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

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

### 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:

$\mu = 3,986 \times 10^{14} \left[ m^3/s^2 \right]$  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 no 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 consequentemente 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 (Vilhena de Moraes em 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 ( $\rho_s$ ):

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

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 ( $\gamma_s$ ) é o ângulo formado entre o vetor posição do satélite e o vetor velocidade orbital.

$$N_{Ax} = D_z me_y - D_y me_z \quad (2.33)$$

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

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

### 3. Ângulo de aspecto solar:

O ângulo de aspecto solar é o ângulo entre o eixo de rotação do satélite e a 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 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 varia em intervalos diferentes para o SCD1 e para o SCD2. Para o SCD1 a faixa considerada ótima da variação do ângulo de aspecto solar é entre 60 a 90 graus e no SCD2 a faixa se torna mais restrita variando de 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.

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

$$\hat{u} \cdot \hat{k} = \cos(\alpha) \cos(\delta) \cos(\alpha s) \cos(\delta s) + \sin(\delta) \sin(\delta s) + \sin(\alpha) \cos(\delta) \sin(\alpha s) \cos(\delta s) = \Gamma \quad (3.2)$$

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

Com os dados de ascensão reta ( $\alpha$ ) e declinação ( $\delta$ ) do eixo de rotação calculados por simulação numérica (CARVALHO, 2013), e o dados de posição do Sol, foi possível calcular o ângulo de aspecto solar utilizando da 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, e ainda com o auxílio do software 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. Foram realizadas simulações de 16 dias para o satélite SCD1 e de 40 dias para o satélite SCD2. Ambos foram comparados com os dados reais fornecidos pelo INPE e com os valores do trabalho de Carvalho, 2013.

Com a finalidade de incrementar a precisão dos resultados os valores do semieixo maior, excentricidade, argumento do perigeu, longitude do nodo ascendente e a inclinação da órbita do satélite foram atualizados a cada dia, o que explica os resultados melhores em comparação com trabalhos anteriores.

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 para o SCD2, a simulação é interrompida e reiniciada a partir do dia seguinte, tomando-se como nova condição inicial um conjunto de valores de atitude do satélite correspondente do arquivo de dados fornecido pelo 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. Estes resultados serão comparados com os resultados trabalho anteriores.

Para ambos os satélites é especificado que o erro das estimativas preditas em 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°.

### 4.1 ABORDAGEM 1 – COM ATUALIZAÇÃO DE DADOS

Nesta abordagem consideramos os valores informados pelo INPE para a execução das simulações numéricas. A cada dia a simulação é reiniciada com novos valores da tabela de dados reais (Tabela A1 e A2). Os resultados obtidos são comparados com os dados reais do INPE e assim é confirmada a validade do propagador de atitude.

#### 4.1.1. SCD1

Para este satélite foi utilizado um intervalo de 16 dias, entre os dias 18/08/1993 a 02/09/1993. 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, sendo também apresentada a média para cada uma das variáveis.

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

Tabela 1 - 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.

<b>Dia</b>	<b><math>\alpha</math></b>	<b><math>\alpha - \alpha_{\text{inpe}}</math></b>	<b><math>\delta</math></b>	<b><math>\delta - \delta_{\text{inpe}}</math></b>	<b>W</b>	<b>W - W<sub>inpe</sub></b>
<b>18/08/1993</b>	280,09	0	81,1	0	87,06	0
<b>19/08/1993</b>	280,1625	-0,8475	81,1679	0,3479	86,9009	0,0209
<b>20/08/1993</b>	281,0777	-0,6623	80,8875	0,3575	86,7246	0,0146
<b>21/08/1993</b>	281,7947	-0,4453	80,5969	0,3669	86,5626	0,0226
<b>22/08/1993</b>	282,2856	-0,2844	80,2966	0,3666	86,3973	0,0273
<b>23/08/1993</b>	282,5984	-0,1016	79,9959	0,3559	86,2373	0,0273
<b>24/08/1993</b>	282,7029	0,0329	79,7048	0,3548	86,0928	0,0528
<b>25/08/1993</b>	282,6638	-0,8362	79,4147	0,1947	85,9269	0,0469
<b>26/08/1993</b>	283,4804	0,4704	79,2837	0,3337	85,7793	-0,0207
<b>27/08/1993</b>	282,9732	0,5432	79,0131	0,3131	85,7082	-0,0218
<b>28/08/1993</b>	282,3777	0,6177	78,7626	0,2826	85,6463	-0,0137
<b>29/08/1993</b>	281,9282	0,9182	78,506	0,236	85,6028	0,0228
<b>30/08/1993</b>	281,1643	0,9843	78,2982	0,2182	85,5295	0,0195
<b>31/08/1993</b>	280,3214	1,0314	78,1103	0,2003	85,4657	0,0257

<b>01/09/1993</b>	279,4188	1,0788	77,9424	0,1614	85,4018	0,0318
<b>02/09/1993</b>	278,5018	1,1418	77,7872	0,1172	85,3324	0,0224
<b>Média</b>	<b>281,4713375</b>	<b>0,2275875</b>	<b>79,4292375</b>	<b>0,262925</b>	<b>86,023025</b>	<b>0,0174</b>

As Tabelas 2, 3 e 4 apresentam as comparações entre os resultados obtidos para os ângulos de ascensão reta e declinação do eixo de rotação e velocidade angular com os valores obtidos por Carvalho (2013). Pelas Tabelas 2 e 3 observa-se que os valores obtidos nas simulações atuais foram maiores do que os obtidos em Carvalho para a ascensão reta e declinação. Para a velocidade angular (Tabela 5) ocorre o mesmo, exceto pelos dias 19 e 25 de agosto. A Tabela 6 apresenta a média dos erros obtidos nas simulações atuais e nas simulações de Carvalho (2013), podendo ser observado que as médias para a simulação atual são menores, com os resultados atuais se aproximando mais dos resultados reais.

Este fato também pode ser observado nas figuras 1, 2 e 3, que mostram o comportamento temporal da ascensão reta e declinação do eixo de rotação e velocidade angular para o período de 16 dias, tanto para a simulação atual quanto para as simulações de Carvalho e os dados reais do INPE. Nas comparações verifica-se um melhor comportamento para todas as variáveis nos resultados das simulações atuais. Saliente-se que nas simulações atuais todos os elementos orbitais e momento residual foram atualizados diariamente, o que acarretou em melhores resultados.

Tabela 2 - Comparação da ascensão reta com resultados de Carvalho (2013).

<b>Dia</b>	<b><math>\alpha(^{\circ})</math></b>	<b><math>\alpha_{\text{Carvalho}}</math> (<math>^{\circ}</math>)</b>	<b><math>\alpha - \alpha_{\text{Carvalho}}</math> (<math>^{\circ}</math>)</b>
<b>18/08/1993</b>	280,09	280,09	0
<b>19/08/1993</b>	280,1625	279,6889	0,4736
<b>20/08/1993</b>	281,0777	280,7076	0,3701
<b>21/08/1993</b>	281,7947	280,7206	1,0741
<b>22/08/1993</b>	282,2856	281,7225	0,5631
<b>23/08/1993</b>	282,5984	281,7522	0,8462
<b>24/08/1993</b>	282,7029	281,7769	0,926

<b>25/08/1993</b>	282,6638	281,783	0,8808
<b>26/08/1993</b>	283,4804	282,7968	0,6836
<b>27/08/1993</b>	282,9732	282,8173	0,1559
<b>28/08/1993</b>	282,3777	281,8335	0,5442
<b>29/08/1993</b>	281,9282	280,8613	1,0669
<b>30/08/1993</b>	281,1643	280,8725	0,2918
<b>31/08/1993</b>	280,3214	279,8876	0,4338
<b>01/09/1993</b>	279,4188	278,9008	0,518
<b>02/09/1993</b>	278,5018	277,9025	0,5993

Tabela 3 - Comparação da declinação com resultados de Carvalho (2013).

<b>Dia</b>	$\delta(^{\circ})$	$\delta_{\text{Carvalho}}(^{\circ})$	$\delta - \delta_{\text{Carvalho}}(^{\circ})$
<b>18/08/1993</b>	81,1	81,1	0
<b>19/08/1993</b>	81,1679	80,9451	0,2228
<b>20/08/1993</b>	80,8875	79,9467	0,9408
<b>21/08/1993</b>	80,5969	79,9468	0,6501
<b>22/08/1993</b>	80,2966	79,9474	0,3492
<b>23/08/1993</b>	79,9959	78,9487	1,0472
<b>24/08/1993</b>	79,7048	78,9487	0,7561
<b>25/08/1993</b>	79,4147	78,9487	0,466
<b>26/08/1993</b>	79,2837	78,9485	0,3352
<b>27/08/1993</b>	79,0131	77,9494	1,0637
<b>28/08/1993</b>	78,7626	77,949	0,8136

<b>29/08/1993</b>	78,506	77,9487	0,5573
<b>30/08/1993</b>	78,2982	77,9487	0,3495
<b>31/08/1993</b>	78,1103	77,9486	0,1617
<b>01/09/1993</b>	77,9424	76,9491	0,9933
<b>02/09/1993</b>	77,7872	76,9491	0,8381

Tabela 4 - Comparação velocidade angular com os resultados de Carvalho (2013).

<b>Dia</b>	<b>W(rpm)</b>	<b>W<sub>carvalho</sub>(rpm)</b>	<b>W - W<sub>carvalho</sub>(rpm)</b>
<b>18/08/1993</b>	87,06	87,06	0
<b>19/08/1993</b>	86,9009	86,9339	-0,033
<b>20/08/1993</b>	86,7246	85,9358	0,7888
<b>21/08/1993</b>	86,5626	85,939	0,6236
<b>22/08/1993</b>	86,3973	85,9405	0,4568
<b>23/08/1993</b>	86,2373	85,9445	0,2928
<b>24/08/1993</b>	86,0928	85,9511	0,1417
<b>25/08/1993</b>	85,9269	85,9527	-0,0258
<b>26/08/1993</b>	85,7793	84,958	0,8213
<b>27/08/1993</b>	85,7082	84,9617	0,7465
<b>28/08/1993</b>	85,6463	84,9653	0,681
<b>29/08/1993</b>	85,6028	84,9722	0,6306
<b>30/08/1993</b>	85,5295	84,9754	0,5541
<b>31/08/1993</b>	85,4657	84,9786	0,4871
<b>01/09/1993</b>	85,4018	84,9816	0,4202

<b>02/09/1993</b>		84,9816	
	85,3324		0,3508

Tabela 5 – Comparação das médias dos erros

	<b>Atual</b>	<b>Carvalho(2013)</b>
<b>W(rpm)</b>	0,0174	-0,4161
<b><math>\alpha(^{\circ})</math></b>	0,227	-0,3616
<b><math>\delta(^{\circ})</math></b>	0,2629	-0,3336

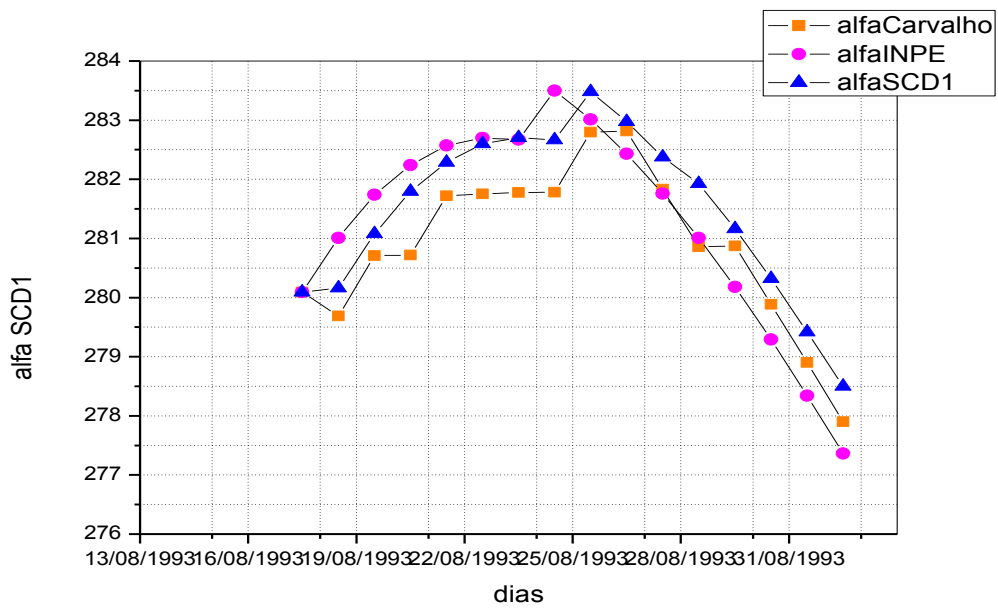


Figura 1 – Comportamento temporal do ângulo de ascensão reta para o satélite SCD1, com atualização diária.



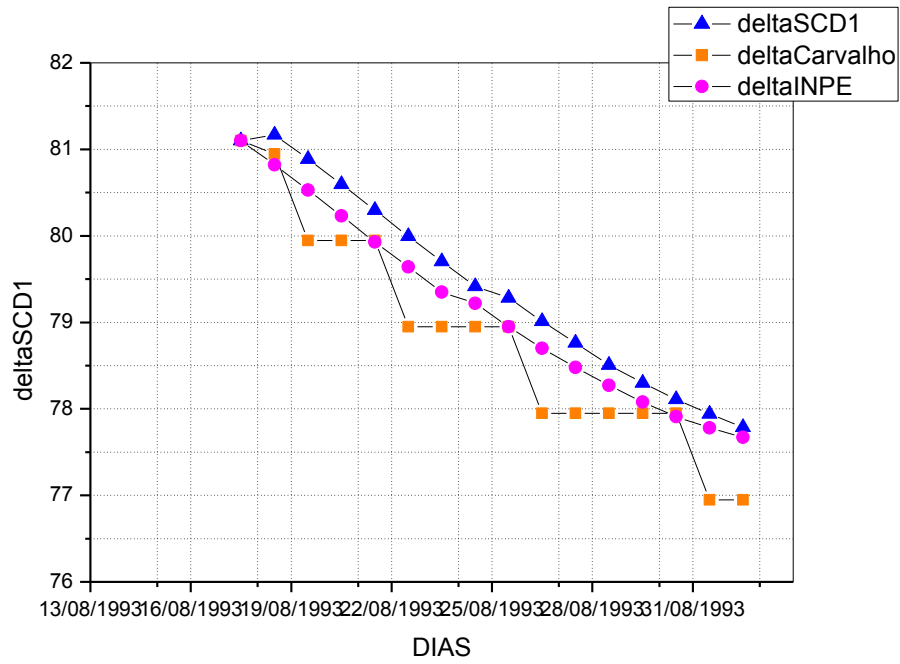


Figura 2 – Comportamento temporal do ângulo de declinação para o satélite SCD1, com atualização diária.

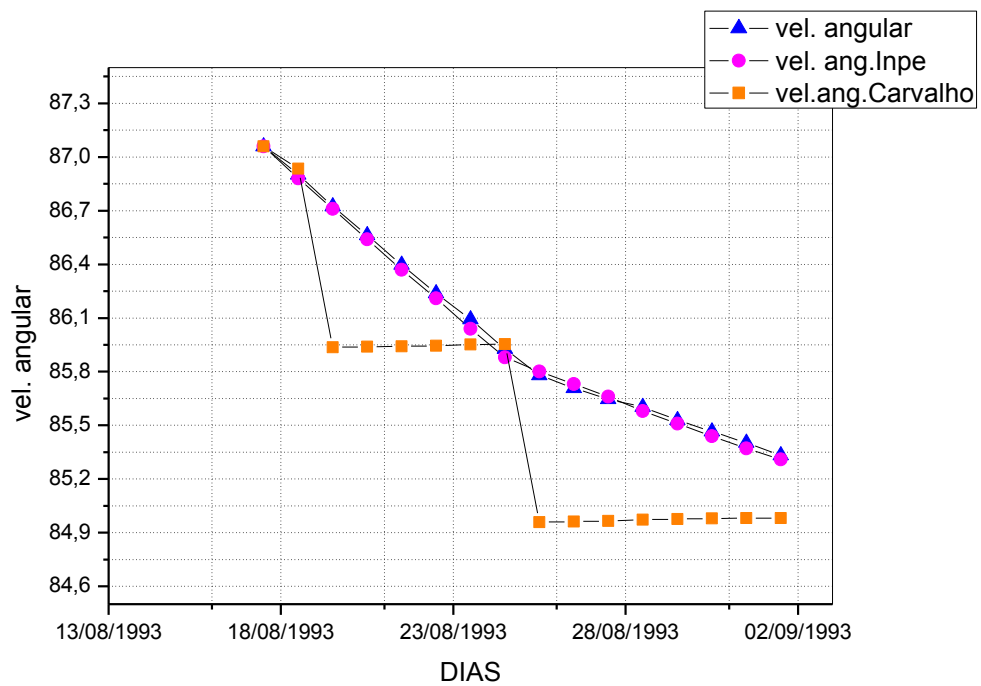


Figura 3 – Comportamento Temporal da velocidade angular para o satélite SCD1, com atualização diária.

#### 4.1.2 ÂNGULO DE ASPECTO SOLAR COM OS VALORES DO SCD1

O cálculo do ângulo de aspecto solar foi calculado 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  $\chi_{\text{inpe}}$ . A Tabela 6 apresenta os resultados obtidos, com a média dos erros ficando em  $-0,1252^\circ$ , dentro da precisão do INPE.

Para fins de comparação, na Figura 4 encontra-se os valores do ângulo de aspecto solar calculados na simulação atual, os calculados com os dados do INPE e os calculados com resultados de Carvalho (2013). A Tabela 7 também apresenta os valores do ângulo de aspecto solar obtidos, para o mesmo período, por Carvalho (2013). Observa-se uma considerável melhora nos resultados da simulação atual em comparação com os resultados de Carvalho (2013), com os valores da simulação atual sendo menores do que os de Carvalho (2013). No entanto, em todos os casos o ângulo de aspecto solar permaneceu dentro da faixa requerida para a missão do SCD1, que é entre  $60^\circ$  e  $90^\circ$ .

Tabela 6 - Valores do ângulo de aspecto solar em comparação com dados do INPE.

<b>Dia</b>	<b><math>\chi</math> (<math>^\circ</math>)</b>	<b><math>\chi</math> (<math>^\circ</math>)<sub>inpe</sub></b>	<b><math>\chi</math> (<math>^\circ</math>)-<math>\chi</math> (<math>^\circ</math>)<sub>inpe</sub></b>
<b>18/08/1993</b>	82,9427	82,9427	0
<b>19/08/1993</b>	83,1378	83,4734	-0,3355
<b>20/08/1993</b>	83,6364	83,9595	-0,3231
<b>21/08/1993</b>	84,1466	84,4511	-0,3045
<b>22/08/1993</b>	84,6246	84,9082	-0,2836
<b>23/08/1993</b>	85,0746	85,3251	-0,2505
<b>24/08/1993</b>	85,5056	85,7332	-0,2277
<b>25/08/1993</b>	85,8965	86,1406	-0,2442
<b>26/08/1993</b>	86,3149	86,4589	-0,1441
<b>27/08/1993</b>	86,6229	86,7335	-0,1106

<b>28/08/1993</b>	86,8885	86,9588	-0,0703
<b>29/08/1993</b>	87,1705	87,1546	0,0159
<b>30/08/1993</b>	87,3683	87,3191	0,0485
<b>31/08/1993</b>	87,5124	87,4345	0,0779
<b>01/09/1993</b>	87,6430	87,5263	0,1167
<b>02/09/1993</b>	82,4432	82,4106	0,03257
<b>média</b>			<b>-0,1251</b>

Tabela 7 - Valores do ângulo de aspecto solar em comparação com os resultados de Carvalho (2013).

<b>Dia</b>	<b><math>\chi</math> (°)</b>	<b><math>\chi</math> (°)Carvalho</b>	<b><math>\chi</math> (°)-<math>\chi</math> (°)Carvalho</b>
<b>18/08/1993</b>	82,9427	82,9427	0
<b>19/08/1993</b>	83,1378	83,2352	-0,0973
<b>20/08/1993</b>	83,6364	84,2311	-0,5947
<b>21/08/1993</b>	84,1466	84,4496	-0,3030
<b>22/08/1993</b>	84,6246	84,7869	-0,1623
<b>23/08/1993</b>	85,0746	85,6501	-0,5755
<b>24/08/1993</b>	85,5056	85,8657	-0,3601
<b>25/08/1993</b>	85,8965	86,0653	-0,1688
<b>26/08/1993</b>	86,3149	86,4283	-0,1134
<b>27/08/1993</b>	86,6229	87,2578	-0,6348
<b>28/08/1993</b>	86,8885	87,2852	-0,3966
<b>29/08/1993</b>	87,1705	87,3114	-0,1409
<b>30/08/1993</b>	87,36826	87,5119	-0,1437
<b>31/08/1993</b>	87,51245	87,5212	-0,0088

<b>01/09/1993</b>	87,6430	88,0416	-0,3986
<b>02/09/1993</b>	82,44320729	83,08027092	-0,6371
<b>média</b>			<b>-0,2959</b>

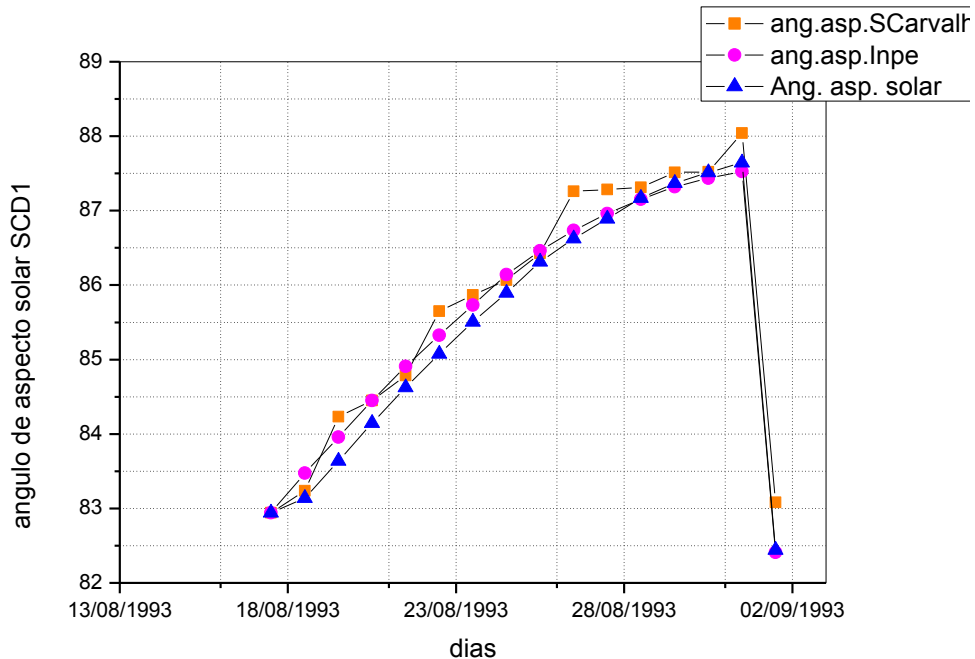


Figura 4 – Gráfico dos valores do ângulo de aspecto solar para o satélite SCD1, com atualização diária.

#### 4.1.3 SCD2

Para o Satélite de Coleta de Dados SCD2 foi utilizado um intervalo de simulação de 40 dias, no período de 01/02/2002 até 12/03/2002. A Tabela 8 apresenta os resultados para este intervalo de simulação, sendo que a média do erro entre a diferença com os dados do INPE não ultrapassou os valores limites especificados, isto é: 0,5° para os valores dos ângulos de ascensão reta e declinação e de 0,5 RPM para a velocidade angular.

Para a comparação com os resultados de Carvalho (2013) foi utilizado um intervalo de 16 dias, entre os dias 12/02/2002 a 27/02/2002, correspondente às simulações por ele realizadas. As comparações estão apresentadas nas Tabelas 9, 10 e 11. A Tabela 12 apresenta as médias dos erros para cada variável. Observa-se uma significativa melhora nos resultados, associada à otimização do programa numérico e as atualizações dos elementos orbitais e momento residual do satélite. Apenas para os três últimos dias da simulação os resultados em ascensão reta não se mostraram adequados.

Nas Figuras 5, 6 e 7 estão apresentados os comportamentos temporais das três variáveis para o período de 40 dias, tanto para as simulações atuais quanto para os dados do INPE, e de 16 dias para os resultados de Carvalho (2013). Observe-se que os resultados apresentados nessas figuras confirmam que os resultados das simulações atuais são bem mais próximos dos valores reais fornecidos pelo INPE do que os resultados de Carvalho (2013), principalmente no que se refere à velocidade angular.

Tabela 8 - Valores dos ângulos de ascensão reta, declinação e velocidade angular do satélite SCD2, com atualização de dados, em comparação com os dados reais fornecidos pelo INPE.

Dia	$\alpha(^{\circ})$	$\alpha - \alpha_{\text{inpe}}$ ( $^{\circ}$ )	$\delta (^{\circ})$	$\delta - \delta_{\text{inpe}}$ ( $^{\circ}$ )	W (rpm)	W - W <sub>inpe</sub> (rpm)
<b>01/02/2002</b>	281,7	0	62,74	0	34,57	0
<b>02/02/2002</b>	281,5041	-0,0259	62,8552	-0,0947	34,5842	-0,0058
<b>03/02/2002</b>	281,3399	-0,0401	63,0947	-0,1072	34,5999	-0,0101
<b>04/02/2002</b>	281,2206	-0,0594	63,3223	-0,1206	34,6137	-0,0163
<b>05/02/2002</b>	280,05	0	63,39	0	34,63	0
<b>06/02/2002</b>	279,9505	-0,1095	63,4913	0,0166	34,6199	-1E-04
<b>07/02/2002</b>	279,9872	-0,1028	63,5518	0,0001	34,6054	-0,0146
<b>08/02/2002</b>	280,0409	-0,0891	63,6101	-0,0041	34,6013	-0,0087
<b>09/02/2002</b>	280,102	-0,078	63,646	-0,032	34,5864	-0,0236
<b>10/02/2002</b>	280,1666	-0,0834	63,6807	-0,0541	34,5829	-0,0171
<b>11/02/2002</b>	280,2479	-0,0621	63,7031	-0,0832	34,5675	-0,0325
<b>12/02/2002</b>	278,71	0	63,47	0	34,48	0
<b>13/02/2002</b>	278,7106	-0,0194	63,4673	-0,0473	34,4316	0,0116
<b>14/02/2002</b>	278,7189	-0,0211	63,43	-0,0336	34,3695	-0,0005
<b>15/02/2002</b>	278,7121	-0,0279	63,3835	-0,0255	34,3173	0,0073
<b>16/02/2002</b>	278,6913	-0,0287	63,3386	-0,0184	34,256	-0,004
<b>17/02/2002</b>	278,6474	-0,0326	63,295	-0,021	34,2042	0,0042
<b>18/02/2002</b>	278,3387	-0,2913	63,4179	0,1215	34,1433	0,0033

19/02/2002	278,2883	-0,2817	63,3983	0,1057	34,083	0,003
20/02/2002	278,2274	-0,2726	63,3769	0,0755	34,0241	0,0041
21/02/2002	278,325	-0,095	63,1689	-0,1481	33,9614	0,0014
22/02/2002	278,2495	-0,0805	63,1496	-0,1925	33,9045	0,0045
23/02/2002	278,1648	-0,0652	63,1402	-0,2188	33,8479	0,0179
24/02/2002	276,6	0	61,22	0	33,69	0
25/02/2002	276,3747	-0,0453	61,1115	-0,0328	33,6417	-0,0483
26/02/2002	276,1639	-0,0361	60,9197	-0,0107	33,643	0,093
27/02/2002	275,954	0,014	60,7184	0,0156	33,5101	0,0301
28/02/2002	275,7031	0,0631	60,5076	0,0398	33,4418	0,0418
01/03/2002	275,3732	0	60,3095	0	33,3759	0
02/03/2002	273,4994	0,1094	59,2679	0,1472	33,4138	0,0038
03/03/2002	273,1226	0,1526	59,0039	0,1532	33,3992	0,0192
04/03/2002	272,7112	0,1912	58,7315	0,1585	33,3763	0,0263
05/03/2002	271,63	0	58,25	0	33,34	0
06/03/2002	271,3676	0,2276	58,1471	0,1521	33,3513	-0,0087
07/03/2002	270,8665	0,2365	57,9093	0,1647	33,3769	-0,0031
08/03/2002	270,3612	0,2912	57,6579	0,142	33,4005	0,0005
09/03/2002	270,1938	0,7038	57,4261	0,1167	33,4208	0,0008
10/03/2002	270,7698	1,8998	57,2147	0,099	33,4481	0,0081
11/03/2002	271,3877	3,1477	57,0143	0,0605	33,468	0,008
12/03/2002	272,0157	4,1757	56,8439	0,0473	33,488	-0,022
<b>Média</b>		<b>0,2722025</b>		<b>0,0320175</b>		<b>0,000485</b>

Tabela 9 - Valores do ângulo de ascensão reta para o SCD2 com atualização de dados em comparação com Carvalho (2013).

<b>Dia</b>	<b><math>\alpha</math>(°)</b>	<b><math>\alpha_{\text{Carvalho}}</math> (°)</b>	<b><math>\alpha - \alpha_{\text{Carvalho}}</math> (°)</b>
<b>12/02/2002</b>	278,71	278,71	0
<b>13/02/2002</b>	278,7106	277,7718	0,9388
<b>14/02/2002</b>	278,7189	277,6796	1,0393
<b>15/02/2002</b>	278,7121	277,673	1,0391
<b>16/02/2002</b>	278,6913	277,6698	1,0215
<b>17/02/2002</b>	278,6474	277,6668	0,9806
<b>18/02/2002</b>	278,3387	277,6696	0,6691
<b>19/02/2002</b>	278,2883	277,6686	0,6197
<b>20/02/2002</b>	278,2274	277,6712	0,5562
<b>21/02/2002</b>	278,325	277,6755	0,6495
<b>22/02/2002</b>	278,2495	277,6768	0,5727
<b>23/02/2002</b>	278,1648	277,6849	0,4799
<b>24/02/2002</b>	276,6	276,6	0
<b>25/02/2002</b>	276,3747	275,7151	0,6596
<b>26/02/2002</b>	276,1639	275,7258	0,4381
<b>27/02/2002</b>	275,954	275,7386	0,2154
<b>Média</b>			<b>0,6175</b>

Tabela 10 - Valores do ângulo da declinação para o SCD2 com atualização de dados em comparação com Carvalho (2013).

<b>Dia</b>	<b><math>\delta</math>(°)</b>	<b><math>\delta_{\text{Carvalho}}</math> (°)</b>	<b><math>\delta - \delta_{\text{Carvalho}}</math> (°)</b>
<b>12/02/2002</b>	63,47	63,47	0
<b>13/02/2002</b>	63,4673	62,8899	0,5774
<b>14/02/2002</b>	63,43	62,9071	0,5229
<b>15/02/2002</b>	63,3835	62,9084	0,4751
<b>16/02/2002</b>	63,3386	62,9089	0,4297
<b>17/02/2002</b>	63,295	62,9094	0,3856
<b>18/02/2002</b>	63,4179	62,909	0,5089
<b>19/02/2002</b>	63,3983	62,9092	0,4891
<b>20/02/2002</b>	63,3769	62,9087	0,4682
<b>21/02/2002</b>	63,1689	62,9079	0,261
<b>22/02/2002</b>	63,1496	62,903	0,2466
<b>23/02/2002</b>	63,1402	62,9016	0,2386
<b>24/02/2002</b>	61,22	61,22	0

<b>25/02/2002</b>	61,1115	60,9013	0,2102
<b>26/02/2002</b>	60,9197	60,899	0,0207
<b>27/02/2002</b>	60,7184	59,898	0,8204
<b>Média</b>			<b>0,3534</b>

Tabela 11 - Valores da velocidade angular para o SCD2 com atualização de dados em comparação com Carvalho (2013).

<b>Dia</b>	<b>W (rpm)</b>	<b>W<sub>carvalho</sub> (rpm)</b>	<b>W - W<sub>carvalho</sub> (rpm)</b>
<b>12/02/2002</b>	34,48	34,48	0
<b>13/02/2002</b>	34,4316	33,9876	0,444
<b>14/02/2002</b>	34,3695	33,962	0,4075
<b>15/02/2002</b>	34,3173	33,9602	0,3571
<b>16/02/2002</b>	34,256	33,9593	0,2967
<b>17/02/2002</b>	34,2042	33,9585	0,2457
<b>18/02/2002</b>	34,1433	33,9592	0,1841
<b>19/02/2002</b>	34,083	33,9589	0,1241
<b>20/02/2002</b>	34,0241	33,9597	0,0644
<b>21/02/2002</b>	33,9614	33,9609	0,0005
<b>22/02/2002</b>	33,9045	32,9639	0,9406
<b>23/02/2002</b>	33,8479	32,966	0,8819
<b>24/02/2002</b>	33,69	33,69	0
<b>25/02/2002</b>	33,6417	32,9719	0,6698
<b>26/02/2002</b>	33,643	32,974	0,669
<b>27/02/2002</b>	33,5101	32,9783	0,5318
<b>Média</b>			<b>0,3636</b>

Tabela 12 – Comparação das médias dos erros

	<b>Atual</b>	<b>Carvalho(2013)</b>
<b>W(rpm)</b>	0,0005	-0.3556
<b><math>\alpha(^{\circ})</math></b>	0,2722	-0.6977
<b><math>\delta(^{\circ})</math></b>	0,0320	-0.3475



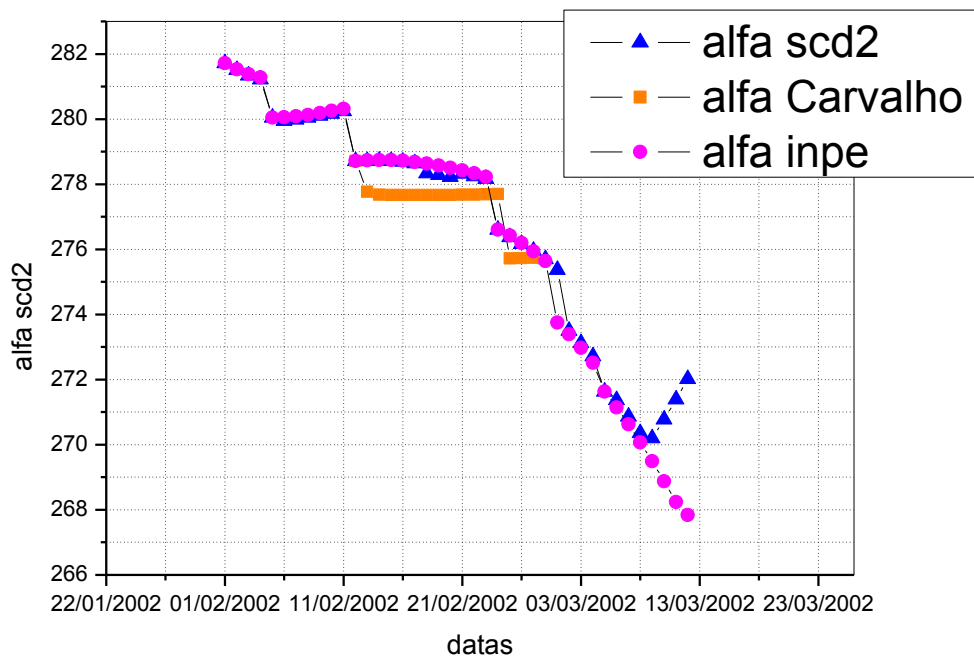


Figura 5 – Comportamento temporal do ângulo de ascensão reta para o satélite SCD2 com atualização diária.

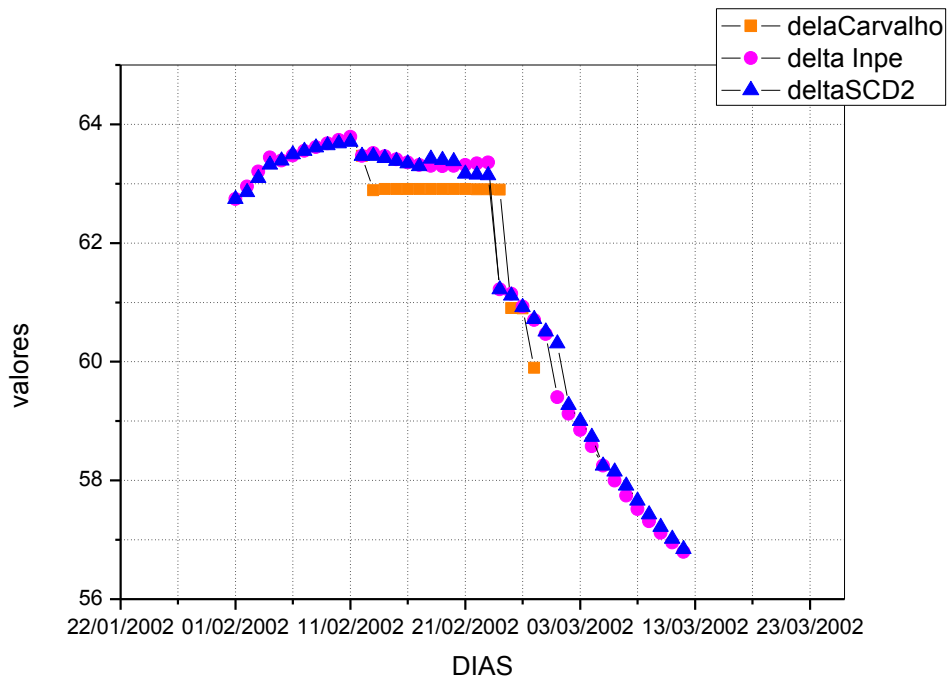


Figura 6 – Comportamento temporal do ângulo de declinação para o satélite SCD2 com atualização diária.

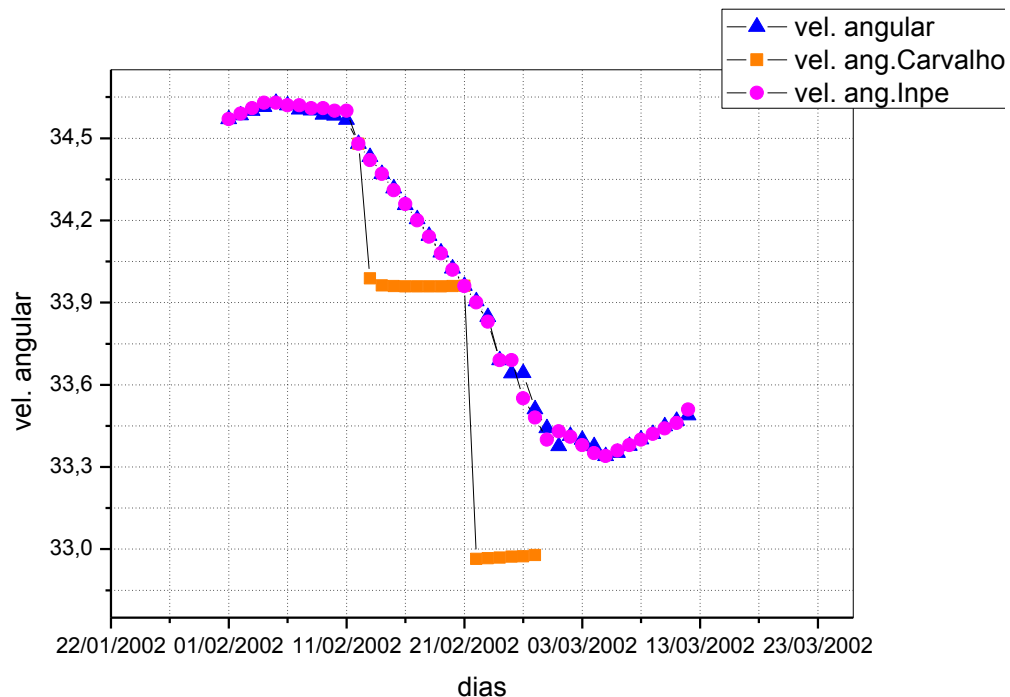


Figura 7 – Comportamento temporal da velocidade angular para o satélite SCD2 com atualização diária.

#### 4.1.4 ÂNGULO DE ASPECTO SOLAR COM OS VALORES DO SCD2

Do mesmo modo que foi feito para o SCD1, para o cálculo do ângulo de aspecto solar do SCD2 foram utilizadas as Eqs (3.2) e (3.3), os resultados da Tabela 8 das simulações atuais, os dados fornecidos pelo INPE (Tabela A2), e os resultados simulados por Carvalho (2013), apresentados nas Tabelas 9, 10 e 11.

Para a comparação com os resultados do INPE foi utilizado o intervalo de 40 dias. Os resultados são apresentados na Tabela 13. A média dos erros sendo de  $-0,1406^\circ$ , embora os resultados para os últimos 3 dias não tenham se mostrado adequados.

A Tabela 14 apresenta a comparação com os resultados da simulação de Carvalho(2013) para o período de 16 dias, entre os dias 12 e 27 de fevereiro de 2002.

Observa-se que para a maioria dos dias o ângulo de aspecto solar assumiu valores menores para a simulação atual do que da simulação de Carvalho (2013).

O comportamento temporal para este ângulo está apresentado na Figura 8, salientando a maior proximidade dos resultados atuais com os resultados do INPE, com exceção dos últimos 3 dias.

Tabela 13- Valores do ângulo de aspecto solar em comparação com os valores do INPE.

<b>Dia</b>	$\chi$ (°)	$\chi_{\text{inpe}}$ (°)	$\chi - \chi_{\text{inpe}}$ (°)
<b>01/02/2002</b>	83,9262	83,9262	0
<b>02/02/2002</b>	84,0496	84,1221	-0,0725
<b>03/02/2002</b>	84,2551	84,3330	-0,0779
<b>04/02/2002</b>	84,4509	84,5332	-0,0823
<b>05/02/2002</b>	84,8004	84,8004	0
<b>06/02/2002</b>	84,8980	84,8549	0,0436
<b>07/02/2002</b>	84,9213	84,8919	0,0294
<b>08/02/2002</b>	84,9334	84,9108	0,0228
<b>09/02/2002</b>	84,9128	84,9136	-0,0008
<b>10/02/2002</b>	84,9136	84,9282	-0,0146
<b>11/02/2002</b>	84,8896	84,9307	-0,04114
<b>12/02/2002</b>	85,2011	85,2011	0
<b>13/02/2002</b>	85,2035	85,2293	-0,0258
<b>14/02/2002</b>	85,1706	85,1859	-0,0153
<b>15/02/2002</b>	85,1589	85,1661	-0,0072
<b>16/02/2002</b>	85,0324	85,0343	-0,0018
<b>17/02/2002</b>	85,1360	85,1377	-0,0017
<b>18/02/2002</b>	85,337	85,1595	0,1776
<b>19/02/2002</b>	85,3392	85,1748	0,1644
<b>20/02/2002</b>	85,3798	85,2364	0,1434
<b>21/02/2002</b>	85,2333	85,2815	-0,0482
<b>22/02/2002</b>	85,2747	85,3500	-0,0753

23/02/2002	85,3217	85,4133	-0,0917
24/02/2002	85,0065	85,0065	0
25/02/2002	85,1244	85,1208	0,0037
26/02/2002	85,1816	85,1709	0,0107
27/02/2002	85,2613	85,2607	0,0007
28/02/2002	85,3551	85,3668	-0,0116
01/03/2002	85,9065	85,9065	0
02/03/2002	86,0955	86,0961	-0,0006
03/03/2002	86,2894	86,3132	-0,0238
04/03/2002	86,5288	86,5749	-0,0460
05/03/2002	87,0598	87,0599	0
06/03/2002	87,3132	87,3911	-0,0779
07/03/2002	87,6478	87,7327	-0,0849
08/03/2002	88,0102	88,1339	-0,1238
09/03/2002	88,1864	88,5384	-0,3519
10/03/2002	88,0139	89,0136	-0,9997
11/03/2002	87,8027	89,4900	-1,6872
12/03/2002	87,6084	89,8670	-2,2586
<b>média</b>			<b>-0,1406</b>

Tabela 14 - Valores do ângulo de aspecto solar em comparação com os resultados do trabalho de Carvalho (2013).

<b>Dia</b>	$\chi$ (°)	$\chi$ Carvalho (°)	$\chi - \chi_{\text{Carvalho}}$ (°)
12/02/2002	85,2011	85,2011	0
13/02/2002	85,2035	85,1279	0,07561

<b>14/02/2002</b>	85,1706	85,1783	-0,0077
<b>15/02/2002</b>	85,1589	85,2102	-0,0512
<b>16/02/2002</b>	85,0324	85,1190	-0,0866
<b>17/02/2002</b>	85,136	85,2462	-0,1101
<b>18/02/2002</b>	85,3379	85,2715	0,0655
<b>19/02/2002</b>	85,3392	85,2779	0,0612
<b>20/02/2002</b>	85,3799	85,3175	0,0623
<b>21/02/2002</b>	85,2333	85,3315	-0,0982
<b>22/02/2002</b>	85,2747	85,3585	-0,0838
<b>23/02/2002</b>	85,3217	85,3804	-0,0587
<b>24/02/2002</b>	85,0065	85,0065	0
<b>25/02/2002</b>	85,1244	85,3077	-0,1833
<b>26/02/2002</b>	85,1816	85,3621	-0,1805
<b>27/02/2002</b>	85,2613	85,0000	0,2613
<b>Média</b>			<b>-0,0209</b>

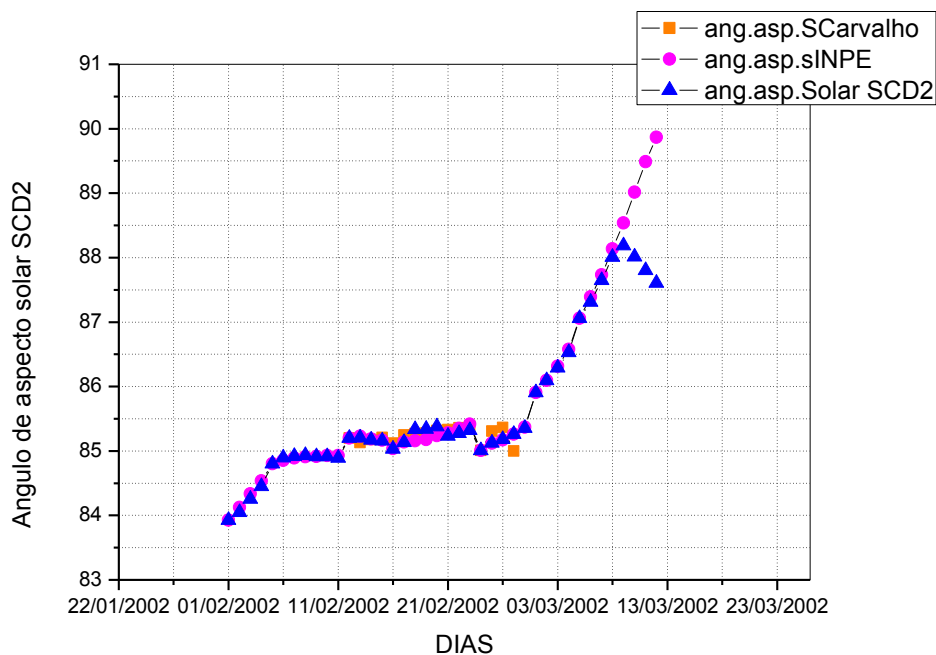


Figura 8 - Comportamento temporal do ângulo de aspecto solar para o satélite SCD2, com atualização diária.

## 4.2. ABORDAGEM 2 – SEM ATUALIZAÇÃO DE DADOS

Nesta nova abordagem a velocidade angular, os ângulos de ascensão reta e declinação do eixo de rotação não mais são atualizados a cada 24hs com os dados fornecidos pelo INPE, com o objetivo de se verificar o intervalo de tempo de aplicação do propagador de atitude dentro das precisões requeridas pelos satélites SCD1 e SCD2.

### 4.2.1. SCD1

Para o este satélite foram considerados dois períodos, o primeiro de 3 dias e o segundo de 4 dias, entre 18/08/1993 a 20/08/1993 e de 26/08/1993 a 29/08/1993, respectivamente, os quais também foram considerado nas simulações de Carvalho(2013). As simulações foram encerradas quando o erro entre a diferença dos valores calculados com os dados do INPE era maior que 0,5 graus para os ângulos de ascensão e declinação e de 0,5 RPM para a velocidade.

Os resultados estão apresentados nas Tabelas 15 e 16, mostrando que a validade do propagador está restrita a apenas um dia, devido principalmente aos erros em ascensão reta e declinação, embora para a velocidade angular os erros ainda estejam dentro do intervalo de precisão requerido.

As Tabelas 17 a 20 apresentam as comparações dos resultados das simulações atuais com os resultados das simulações de Carvalho (2013). Verifica-se que todos os

resultados atuais são maiores que os de Carvalho (2013), embora o intervalo de validade da propagação de Carvalho tenha também sido de um dia.

Tabela 15 - Valores do ângulo de ascensão reta, declinação e velocidade angular do satélite SCD1 sem atualização de dados, em comparação com os dados reais fornecidos pelo INPE.

Dia	$\alpha$ (°)	$\alpha - \alpha_{\text{inpe}}$ (°)	$\delta$ (°)	$\delta - \delta_{\text{inpe}}$ (°)	W (rpm)	W - W <sub>inpe</sub> (rpm)
18/08/1993	280,09	0	81,1	0	87,06	0
19/08/1993	280,4101	-0,5999	81,0779	0,2579	86,926	0,046
20/08/1993	280,5231	-1,2169	81,1428	0,6128	86,7722	0,0622

Tabela 16 - Valores do ângulo de ascensão reta, declinação e velocidade angular do satélite SCD1, sem atualização de dados em comparação com os dados reais fornecidos pelo INPE.

Dia	$\alpha$ (°)	$\alpha - \alpha_{\text{inpe}}$ (°)	$\delta$ (°)	$\delta - \delta_{\text{inpe}}$ (°)	W(rpm)	W - W <sub>inpe</sub> (rpm)
26/08/1993	283,01	0	78,95	0	85,8	0
27/08/1993	283,0061	0,5761	79,0119	0,3119	85,7095	-0,0205
28/08/1993	283,1941	1,4341	79,0403	0,5603	85,6375	-0,0225
29/08/1993	283,3668	2,3568	79,0709	0,8009	85,5792	-0,0008

Tabela 17 - Valores do ângulo de ascensão reta, declinação do satélite SCD1 sem atualização de dados em comparação com Carvalho (2013).

Dia	$\alpha$ (°)	$\alpha_{\text{Carvalho}}$ (°)	$\alpha - \alpha_{\text{Carvalho}}$ (°)	$\delta$ (°)	$\delta_{\text{Carvalho}}$ (°)	$\delta - \delta_{\text{Carvalho}}$ (°)
18/08/1993	280,09	280,09	0	81,1	81,1	0
19/08/1993	280,4101	279,6889	0,7212	81,0779	80,9451	0,1328
20/08/1993	280,5231	278,7199	1,8032	81,1428	79,9455	1,1973

Tabela 18 - Valores da velocidade angular do satélite SCD1 sem atualização de dados em comparação com Carvalho (2013).

<b>Dia</b>	<b>W(rpm)</b>	<b>W<sub>carvalho</sub>(rpm)</b>	<b>W - W<sub>carvalho</sub> (rpm)</b>
<b>18/08/1993</b>	87,06	87,06	0
<b>19/08/1993</b>	86,926	86,9339	-0,0079
<b>20/08/1993</b>	86,7722	85,9367	0,8355

Tabela 19 - Valores do ângulo de ascensão reta e declinação do satélite SCD1 sem atualização de dados em comparação com Carvalho (2013).

<b>Dia</b>	<b><math>\alpha</math> (°)</b>	<b><math>\alpha_{\text{Carvalho}}</math> (°)</b>	<b><math>\alpha - \alpha_{\text{Carvalho}}</math> (°)</b>	<b><math>\delta</math> (°)</b>	<b><math>\delta_{\text{Carvalho}}</math> (°)</b>	<b><math>\delta - \delta_{\text{Carvalho}}</math> (°)</b>
<b>26/08/1993</b>	283,01	283,01	0	78,95	78,95	0
<b>27/08/1993</b>	283,0061	282,8173	0,1888	79,0119	77,9494	1,0625
<b>28/08/1993</b>	283,1941	281,8368	1,3573	79,0403	76,9493	2,091
<b>29/08/1993</b>	283,3668	280,8634	2,5034	79,0709	75,949	3,1219

Tabela 20- Valores da velocidade angular do satélite SCD1 sem atualização de dados em comparação com Carvalho (2013).

<b>Dia</b>	<b>W (rpm)</b>	<b>W<sub>carvalho</sub>(rpm)</b>	<b>W - W<sub>carvalho</sub> (rpm)</b>
<b>26/08/1993</b>	85,8	85,8	0
<b>27/08/1993</b>	85,7095	84,9617	0,7478
<b>28/08/1993</b>	85,6375	83,9657	1,6718
<b>29/08/1993</b>	85,5792	82,9728	2,6064



#### 4.2.2. ÂNGULO DE ASPECTO SOLAR COM DADOS DO SCD1

Do mesmo modo que para a abordagem com atualização de dados, o ângulo de aspecto solar foi calculado utilizando agora os resultado da ascensão reta e declinação do item 4.2.1.

As Tabelas 21 e 22 apresentam os resultados da comparação com os dados do INPE para os dois intervalos considerados. Verifica-se que para o segundo período o erro no ângulo de aspecto solar ainda se encontra dentro da precisão requerida pelo INPE, do mesmo que para a velocidade angular, com o comprometimento da propagação sendo causado pelos erros na ascensão reta e declinação.

As Tabelas 23 e 24 apresentam os resultados das comparações com os resultados de Carvalho (2013) para os mesmos dois períodos, indicando que os resultados atuais são sempre menores do que os resultados de Carvalho (2013).

Tabela 21 - Valores do ângulo de aspecto solar em comparação com os valores do INPE.

<b>Dia</b>	<b><math>\chi</math> (°)</b>	<b><math>\chi_{inpe}</math>(°)</b>	<b><math>\chi - \chi_{inpe}</math> (°)</b>
<b>18/08/1993</b>	82,9427	82,9427	0
<b>19/08/1993</b>	83,2272	83,4733	-0,2461
<b>20/08/1993</b>	83,3995	83,9595	-0,5599

Tabela 22 - Valores do ângulo de aspecto solar em comparação com os valores do INPE.

<b>Dia</b>	<b><math>\chi</math> (°)</b>	<b><math>\chi_{inpe}</math> (°)</b>	<b><math>\chi - \chi_{inpe}</math> (°)</b>
<b>26/08/1993</b>	86,4589	86,4589	0
<b>27/08/1993</b>	86,6286	86,7335	-0,1049
<b>28/08/1993</b>	86,8457	86,9588	-0,1131
<b>29/08/1993</b>	87,0631	87,1546	-0,0915

Tabela 23 - Valores do ângulo de aspecto solar em comparação com os valores do trabalho de Carvalho (2013).

<b>Dia</b>	$\chi$ (°)	$\chi_{\text{Carvalho}}$ (°)	$\chi - \chi_{\text{Carvalho}}$ (°)
<b>18/08/1993</b>	82,9427	82,9427	0
<b>19/08/1993</b>	83,2272	83,2351	-0,0079
<b>20/08/1993</b>	83,3996	84,2311	-0,8315

Tabela 24 - Valores do ângulo de aspecto solar em comparação com o trabalho de Carvalho (2013).

<b>Dia</b>	$\chi$ (°)	$\chi_{\text{Carvalho}}$ (°)	$\chi - \chi_{\text{Carvalho}}$ (°)
<b>26/08/1993</b>	86,4589	86,4589	0
<b>27/08/1993</b>	86,6286	87,2578	-0,6292
<b>28/08/1993</b>	86,8457	87,2851	-0,4394
<b>29/08/1993</b>	87,0631	87,3114	-0,2483

#### 4.2.3. SCD2

Para o SCD2 foi considerado o primeiro período de 4 dias e o segundo de 5 dias, corresponde aos intervalos do dia 20/02/2002 a 23/02/2002 e do dia 24/02/2002 a 28/02/2002, respectivamente. As Tabelas 25 e 26 apresentam os resultados para estes dois intervalos. Em ambos os períodos, embora os erros estejam dentro dos limites de precisão, a simulação foi interrompida devido a atuação do controle. Portanto para um satélite com as características do SCD2 o propagador de atitude é válido para períodos de 4 dias.

As Tabelas de 27 a 30 apresentam as comparações com os resultados de Carvalho (2013), sendo que o segundo período foi também de 4 dias (dia 24/02/2002 a 27/02/2002). Em ambos os intervalos a velocidade angular, a ascensão reta e declinação da simulação atual tiveram valores maiores do que os de Carvalho (2013), aproximando-se mais dos dados reais.

Tabela 25- Valores do ângulo de ascensão reta, declinação e velocidade angular do satélite SCD2 sem atualização de dados em comparação com os dados reais fornecidos pelo INPE.

Dia	$\alpha$ (°)	$\alpha - \alpha_{\text{inpe}}$ (°)	$\delta$ (°)	$\delta - \delta_{\text{inpe}}$ (°)	W	W - $W_{\text{inpe}}$
20/02/2002	278,5	0	63,3014	0	34,02	0
21/02/2002	278,325	-0,0950	63,1689	-0,1481	33,9614	0,0014
22/02/2002	278,2073	-0,1227	63,0848	-0,2573	33,9096	0,0096
23/02/2002	278,093	-0,137	63,0021	-0,3569	33,8611	0,0311

Tabela 26 - Valores do ângulo de ascensão reta, declinação e velocidade angular do satélite SCD2, sem atualização de dados em comparação com os dados reais fornecidos pelo INPE.

Dia	$\alpha$ (°)	$\alpha - \alpha_{\text{inpe}}$ (°)	$\delta$ (°)	$\delta - \delta_{\text{inpe}}$ (°)	W	W - $W_{\text{inpe}}$
24/02/2002	276,6	0	61,22	0	33,69	0
25/02/2002	276,3747	-0,0453	61,1115	-0,0328	33,6417	-0,0483
26/02/2002	276,2639	0,0639	61,0385	0,1081	33,6069	0,0569
27/02/2002	276,1584	0,2184	60,9675	0,2647	33,5773	0,0973
28/02/2002	275,8874	0,2474	60,8577	0,3899	33,5404	0,1404

Tabela 27 - Valores do ângulo de ascensão reta e declinação do satélite SCD2 sem atualização de dados, em comparação com Carvalho (2013), para o primeiro intervalo.

Dia	$\alpha$ (°)	$\alpha_{\text{Carvalho}}$ (°)	$\alpha - \alpha_{\text{Carvalho}}$ (°)	$\delta$ (°)	$\delta_{\text{Carvalho}}$ (°)	$\delta - \delta_{\text{Carvalho}}$ (°)
20/02/2002	278,5	278,5	0	63,3014	63,3014	0
21/02/2002	278,325	277,6755	0,6495	63,1689	62,9079	0,261

<b>22/02/2002</b>	278,2073	276,6828	1,5245	63,0848	61,905	1,1798
<b>23/02/2002</b>	278,093	275,6899	2,4031	63,0021	60,9017	2,1004

Tabela 28 - Valores da velocidade angular do satélite SCD2 sem atualização de dados em comparação com Carvalho (2013), para o primeiro intervalo.

<b>Dia</b>	<b>W (rpm)</b>	<b>W<sub>carvalho</sub> (rpm)</b>	<b>W - W<sub>carvalho</sub> (rpm)</b>
<b>20/02/2002</b>	34,02	34,02	0
<b>21/02/2002</b>	33,9614	33,9609	0,0005
<b>22/02/2002</b>	33,9096	32,9639	0,9457
<b>23/02/2002</b>	33,8611	31,9672	1,8939

Tabela 29 - Valores do ângulo de ascensão reta e declinação do satélite SCD2 sem atualização de dados em comparação com Carvalho (2013), para o segundo intervalo.

<b>Dia</b>	<b><math>\alpha</math> (°)</b>	<b><math>\alpha_{\text{Carvalho}}</math> (°)</b>	<b><math>\alpha - \alpha_{\text{Carvalho}}</math> (°)</b>	<b><math>\delta</math> (°)</b>	<b><math>\delta_{\text{Carvalho}}</math> (°)</b>	<b><math>\delta - \delta_{\text{Carvalho}}</math> (°)</b>
<b>24/02/2002</b>	276,6	276,6	0	61,22	61,22	0
<b>25/02/2002</b>	276,3747	275,7151	0,6596	61,1115	60,9013	0,2102
<b>26/02/2002</b>	276,2639	274,7237	1,5402	61,0385	59,8971	1,1414
<b>27/02/2002</b>	276,1584	273,7326	2,4258	60,9675	58,8922	2,0753

Tabela 30 – Valores da velocidade angular do SCD2 sem atualização de dados em comparação com Carvalho (2013), para o segundo intervalo.

<b>Dia</b>	<b>W (rpm)</b>	<b>W<sub>carvalho</sub> (rpm)</b>	<b>W - W<sub>carvalho</sub> (rpm)</b>
<b>24/02/2002</b>	33,69	33,69	0

<b>25/02/2002</b>	33,6417	32,9719	0,6698
<b>26/02/2002</b>	33,6069	31,9757	1,6312
<b>27/02/2002</b>	33,5773	30,9799	2,5974

#### 4.2.4. ÂNGULO DE ASPECTO SOLAR COM DADOS DO SCD2

Do mesmo modo que para o SCD1, os cálculos para o ângulo de aspecto solar foram realizados utilizando os resultados do item 4.2.3. As Tabelas 31 e 32 apresentam os resultados obtidos nas simulações para os dois períodos. Do mesmo modo que para a velocidade de rotação, ascensão reta e declinação, os erros permanecem dentro da precisão requerida e as simulações só foram interrompidas devido a atuação do controle.

As Tabelas 33 e 34 apresentam as comparações com os resultados de Carvalho (2013), sendo o segundo período foi só de 4 dias.

Tabela 31 - Valores do ângulo de aspecto solar em comparação com os valores do INPE.

<b>Dia</b>	$\chi$ (°)	$\chi_{inpe}$ (°)	$\chi - \chi_{inpe}$ (°)
<b>20/02/2002</b>	85,2364	85,2364	0
<b>21/02/2002</b>	85,2333	85,2816	-0,0482
<b>22/02/2002</b>	85,2552	85,3500	-0,0948
<b>23/02/2002</b>	85,2758	85,4133	-0,1375

Tabela 32 - Valores do ângulo de aspecto solar em comparação com os valores do INPE.

<b>Dia</b>	$\chi$ (°)	$\chi_{inpe}$ (°)	$\chi - \chi_{inpe}$ (°)
<b>24/02/2002</b>	85,0065	85,0065	0
<b>25/02/2002</b>	85,1244	85,1208	0,0036
<b>26/02/2002</b>	85,1921	85,1709	0,0218
<b>27/02/2002</b>	85,2813	85,2607	0,020

<b>28/02/2002</b>	85,42	85,3668	0,0532
-------------------	-------	---------	--------

Tabela 33- Valores do ângulo de aspecto solar em comparação com os valores calculados com os resultados fornecidos pelo trabalho de Carvalho (2013).

<b>Dia</b>	$\chi$ (°)	$\chi_{\text{Carvalho}}$ (°)	$\chi - \chi_{\text{Carvalho}}$ (°)
<b>20/02/2002</b>	85,2364	85,2364	0
<b>21/02/2002</b>	85,2333	85,3315	-0,0982
<b>22/02/2002</b>	85,2552	85,3585	-0,1033
<b>23/02/2002</b>	85,2759	85,3804	-0,1045

Tabela 34- Valores do ângulo de aspecto solar em comparação com os valores calculados com os resultados fornecidos pelo trabalho de Carvalho (2013).

<b>Dia</b>	$\chi$ (°)	$\chi_{\text{Carvalho}}$ (°)	$\chi - \chi_{\text{Carvalho}}$ (°)
<b>24/02/2022</b>	85,0065	85,0065	0
<b>25/02/2022</b>	85,1244	85,3077	-0,1833
<b>26/02/2022</b>	85,1927	85,3621	-0,1694
<b>27/02/2022</b>	85,2813	85,0000	0,2813

## 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, ascensão reta e declinação do eixo de rotação e ângulo de aspecto solar fornecidos pelo CRC/INPE. Todos os resultados também foram comparados com os resultados das simulações realizadas por Carvalho (2013). Saliente-se que o programa numérico desenvolvido é muito extenso devido a 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.

Para validar o propagador de atitude foram realizadas duas abordagens. A primeira com a atualização diária dos dados de atitude com os dados fornecidos pelo CRC/INPE. Na segunda abordagem os dados de atitude não são atualizados. Para fins de comparação foram consideradas as precisões requeridas para as estimativas nas missões destes dois satélites, ou seja:  $0,5^\circ$  para os ângulos e de 0,5rpm para a velocidade de rotação.

Na primeira abordagem, com atualização diária de dados, os resultados apresentados para o SCD1 apresentaram-se satisfatórios para as três variáveis. Apesar de que em algumas datas as diferenças terem sido maiores do que a requerida pelo INPE a média para todos os resultados ficou sempre abaixo dos valores limites especificados para a missão. Para o SCD2 os resultados também foram bastante favoráveis com a média da diferença sendo menor que a requerida pelo instituto INPE. Os resultados para o ângulo de aspecto solar para esta primeira abordagem também foram bastante satisfatórios e permaneceram na faixa de tolerância. Da comparação com os resultados de Carvalho (2013) verificou os resultados das simulações atuais aproximaram-se mais dos dados reais.

Na segunda abordagem, em que não é considerada a atualização diária de dados, verificou-se que, no caso do satélite SCD1, em ambos os intervalos considerados, os resultados só foram adequados para o ângulo de ascensão reta e declinação para um intervalo de um dia de simulação, embora para a velocidade angular e ângulo de aspecto solar os resultados tenham sido satisfatório para intervalos maiores. Para o satélite SCD2, os dois intervalos de simulação foram interrompidos devido a atuação do controle, sendo que a velocidade angular, ascensão reta, declinação e ângulo de aspecto solar permaneceram dentro das precisões desejadas para os períodos considerados de 4 e 5 dias.

Da comparação com os resultados de Carvalho (2013) verificou-se ter sido obtida uma melhora significativa nos resultados. Isto é justificado pela otimização realizada no programa numérico e pelo fato dos elementos orbitais e momento residual dos satélites terem sido atualizados diariamente.

Deste modo, para melhor validar o propagador de atitude desenvolvido é interessante aplica-lo a outros intervalos correspondendo a outros dados dos satélites.

Durante este período teve-se a oportunidade de participar de curso para familiarização aos assuntos abordados, como a XVIII Escola em Dinâmica Orbital e

Planetologia, ao Flisol (Festival Latino-americano de Instalação de Software Livres) e teve resumo aprovado para a apresentação de painel de iniciação no congresso CNMAC2014, o qual irá acontecer em setembro em Natal. Foi também submetido um trabalho para apresentação no CBDO2014.



## 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.; ZANARDI, M.C.F.P.S. Desenvolvimento do Torque Pressão de Radiação Solar Direta Utilizando Quatérnions de Atitude. **Resumos do XV Colóquio Brasileiro de Dinâmica Orbital**, pp. 97. Teresópolis, RJ, 2010.
- 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.

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 quaternions**. 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  $\alpha$  - ascensão reta do eixo de rotação,  $\delta$  - declinação do eixo de rotação do satélite,  $W$  - velocidade de rotação.**

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

<b>13/8/1993</b>	272,5400	82,0600	87,8500
<b>14/8/1993</b>	275,7500	81,8500	87,6100
<b>15/8/1993</b>	277,4500	81,6200	87,4200
<b>16/8/1993</b>	278,9000	81,3700	87,2400
<b>17/8/1993</b>	280,0900	81,1000	87,0600
<b>18/8/1993</b>	281,0100	80,8200	86,8800
<b>19/8/1993</b>	281,7400	80,5300	86,7100
<b>20/8/1993</b>	282,2400	80,2300	86,5400
<b>21/8/1993</b>	282,5700	79,9300	86,3700
<b>22/8/1993</b>	282,7000	79,6400	86,2100
<b>23/8/1993</b>	282,6700	79,3500	86,0400
<b>24/8/1993</b>	283,5000	79,2200	85,8800
<b>25/8/1993</b>	283,0100	78,9500	85,8000
<b>26/8/1993</b>	282,4300	78,7000	85,7300
<b>27/8/1993</b>	281,7600	78,4800	85,6600
<b>28/8/1993</b>	281,0100	78,2700	85,5800
<b>29/8/1993</b>	280,1800	78,0800	85,5100
<b>30/8/1993</b>	279,2900	77,9100	85,4400
<b>31/8/1993</b>	278,3400	77,7800	85,3700
<b>1/9/1993</b>	277,3600	77,6700	85,3100

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

<b>Dia</b>	$\alpha_{INPE}$ (°)	$\delta_{INPE}$ (°)	$W_{INPE}$ (rpm)
<b>1/2/2002</b>	281,7200	62,7400	34,5700
<b>2/2/2002</b>	281,5300	62,9499	34,5900
<b>3/2/2002</b>	281,3800	63,2019	34,6100
<b>4/2/2002</b>	281,2800	63,4429	34,6300
<b>5/2/2002</b>	280,0500	63,3900	34,6300
<b>6/2/2002</b>	280,0600	63,4747	34,6200
<b>7/2/2002</b>	280,0900	63,5517	34,6200
<b>8/2/2002</b>	280,1300	63,6142	34,6100
<b>9/2/2002</b>	280,1800	63,6780	34,6100
<b>10/2/2002</b>	280,2500	63,7348	34,6000
<b>11/2/2002</b>	280,3100	63,7863	34,6000
<b>12/2/2002</b>	278,7100	63,4700	34,4800
<b>13/2/2002</b>	278,7300	63,5146	34,4200
<b>14/2/2002</b>	278,7400	63,4636	34,3700
<b>15/2/2002</b>	278,7400	63,4090	34,3100
<b>16/2/2002</b>	278,7200	63,3570	34,2600
<b>17/2/2002</b>	278,6800	63,3160	34,2000
<b>18/2/2002</b>	278,6300	63,2964	34,1400
<b>19/2/2002</b>	278,5700	63,2926	34,0800
<b>20/2/2002</b>	278,5000	63,3014	34,0200
<b>21/2/2002</b>	278,4200	63,3170	33,9600
<b>22/2/2002</b>	278,3300	63,3421	33,9000

<b>23/2/2002</b>	278,2300	63,3590	33,8300
<b>24/2/2002</b>	276,6000	61,2200	33,6900
<b>25/2/2002</b>	276,4200	61,1443	33,6900
<b>26/2/2002</b>	276,2000	60,9304	33,5500
<b>27/2/2002</b>	275,9400	60,7028	33,4800
<b>28/2/2002</b>	275,6400	60,4678	33,4000
<b>1/3/2002</b>	273,7500	59,4002	33,4300
<b>2/3/2002</b>	273,3900	59,1207	33,4100
<b>3/3/2002</b>	272,9700	58,8507	33,3800
<b>4/3/2002</b>	272,5200	58,5730	33,3500
<b>5/3/2002</b>	271,6300	58,2500	33,3400
<b>6/3/2002</b>	271,1400	57,9950	33,3600
<b>7/3/2002</b>	270,6300	57,7446	33,3800
<b>8/3/2002</b>	270,0700	57,5159	33,4000
<b>9/3/2002</b>	269,4900	57,3094	33,4200
<b>10/3/2002</b>	268,8700	57,1157	33,4400
<b>11/3/2002</b>	268,2400	56,9538	33,4600
<b>12/3/2002</b>	267,8400	56,7966	33,5100

## APÊNDICE B

### ASCENSÃO RETA E DECLINAÇÃO DO SOL

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

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

<b>14/8/1993</b>	144,55	14,12
<b>15/8/1993</b>	145,48	13,80
<b>16/8/1993</b>	146,43	13,48
<b>17/8/1993</b>	147,35	13,17
<b>18/8/1993</b>	148,28	12,83
<b>19/8/1993</b>	149,20	12,52
<b>20/8/1993</b>	150,13	12,18
<b>21/8/1993</b>	151,05	11,85
<b>22/8/1993</b>	151,98	11,52
<b>23/8/1993</b>	152,90	11,17
<b>24/8/1993</b>	153,83	10,83
<b>25/8/1993</b>	154,73	10,48
<b>26/8/1993</b>	155,65	10,13
<b>27/8/1993</b>	156,58	9,78
<b>28/8/1993</b>	157,48	9,43
<b>29/8/1993</b>	158,38	9,07
<b>30/8/1993</b>	159,30	8,72
<b>31/8/1993</b>	160,20	8,35



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

<b>Dia</b>	<b>Ascensão Reta do Sol(°)</b>	<b>Declinação do Sol(°)</b>
<b>1/2/2002</b>	315,43	-16,92
<b>2/2/2002</b>	316,45	-16,63
<b>3/2/2002</b>	317,45	-16,33
<b>4/2/2002</b>	318,48	-16,03
<b>5/2/2002</b>	319,48	-15,73
<b>6/2/2002</b>	320,48	-15,43
<b>7/2/2002</b>	321,48	-15,12
<b>8/2/2002</b>	322,48	-14,80
<b>9/2/2002</b>	323,45	-14,47
<b>10/2/2002</b>	324,45	-14,15
<b>11/2/2002</b>	325,43	-13,82
<b>12/2/2002</b>	326,43	-13,48
<b>13/2/2002</b>	327,40	-13,15
<b>14/2/2002</b>	328,38	-12,80
<b>15/2/2002</b>	329,35	-12,47
<b>16/2/2002</b>	330,33	-12,00
<b>17/2/2002</b>	331,28	-11,77
<b>18/2/2002</b>	332,25	-11,42
<b>19/2/2002</b>	333,20	-11,05
<b>20/2/2002</b>	334,18	-10,70
<b>21/2/2002</b>	335,13	-10,33
<b>22/2/2002</b>	336,08	-9,97

<b>23/2/2002</b>	337,03	-9,60
<b>24/2/2002</b>	337,98	-9,23
<b>25/2/2002</b>	338,93	-8,87
<b>26/2/2002</b>	339,88	-8,48
<b>27/2/2002</b>	340,80	-8,12
<b>28/2/2002</b>	341,75	-7,73
<b>1/3/2002</b>	342,68	-7,35
<b>2/3/2002</b>	343,63	-6,97
<b>3/3/2002</b>	344,55	-6,58
<b>4/3/2002</b>	345,48	-6,20
<b>5/3/2002</b>	346,40	-5,82
<b>6/3/2002</b>	347,35	-5,43
<b>7/3/2002</b>	348,28	-5,03
<b>8/3/2002</b>	349,20	-4,65
<b>9/3/2002</b>	350,10	-4,25
<b>10/3/2002</b>	351,03	-3,87
<b>11/3/2002</b>	351,95	-3,47
<b>12/3/2002</b>	352,88	-3,08