



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

PROPAGAÇÃO DA ATITUDE DE SATÉLITES ARTIFICIAIS COM QUATÉRNIONS E TORQUE DEVIDO À FORÇA DE LORENTZ

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

Pedro Raphael de Souza Pedroso Bento (UNESP, Bolsista PIBIC/CNPq)
Email: prdsouza@gmail.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: cecilia@feg.unesp.br

Julho de 2010

Relatório corrigido e aprovado.

Valcir Orlando
Orientador

Maria Cecília F. P. S. Zanardi
Co-orientadora

Pedro Raphael de Souza Pedroso Bento
Orientado

AGRADECIMENTOS

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

Os objetivos principais deste trabalho são apresentar um modelo para o torque devido à força de Lorentz (torque elétrico) atuante em satélites artificiais, verificar a sua influência no movimento rotacional de satélites artificiais e analisar seu comportamento mediante a variação de alguns de seus parâmetros chave. Muitas análises foram realizadas para avaliar os efeitos do torque devido à força de Lorentz e mostraram que em princípio este possui valor negligenciável em relação aos demais torques. Entretanto, a necessidade de alta precisão nos resultados de experimentos espaciais de certas missões requer um conhecimento claro do efeito eletrodinâmico conectado a tal torque. A carga elétrica do satélite é a grandeza essencial na determinação da magnitude do torque devido à força de Lorentz. A teoria aqui apresentada é importante para a análise da dinâmica de atitude de satélites artificiais. A influência do torque elétrico no movimento rotacional do satélite pode ser determinada pela integração numérica das equações deste movimento, após a substituição das expressões das componentes do torque elétrico expressas no sistema principal, nas equações de Euler. Neste trabalho o movimento rotacional é descrito pelas equações de Euler e pelas equações cinemáticas em termos de quatérnions. A partir dos resultados numéricos obtidos pretende-se verificar o comportamento global de tal torque para diversas configurações de distribuição de carga elétrica. A relação entre o torque elétrico e a altitude do satélite também é avaliada, já que para altitudes mais baixas o campo geomagnético é mais forte e, conseqüentemente, torna-se maior a interação entre ele e a carga elétrica inerente ao satélite artificial. Esta análise poderá ser útil para as missões de satélites brasileiros, principalmente no que se refere à propagação e controle de atitude de satélites.

ATTITUDE PROPAGATION OF ARTIFICIAL SATELLITE WITH QUATERNIONS AND TORQUE DUE LORENTZ FORCE

ABSTRACT

The main objectives of this paper are to present a model to the torque due to Lorentz force (electrical torque) acting on artificial satellites, check its influence on the rotational motion of artificial satellites and analyze its behavior by varying some of its key parameters. Many tests were performed to evaluate the effects of the torque due to Lorentz force and showed that in principle this has negligible value in comparison with other torques. However, the need for precision in the results of space experiments on certain mission requires clear understanding of the electrodynamic effects connected to this torque. The electric charge of the satellite is the essential term in determining the magnitude of the torque due to Lorentz force. The theory presented here is important to analyze the attitude dynamics of artificial satellites. The influence of Torque Electric in rotational movement of the satellite can be determined by numerical integration of the equations of this movement, after replacement of the components of electric torque expressed in the main system in the Euler equations. In this study the rotational motion is described by Euler equations and the kinematic equations in terms of quaternions. From the numerical results is intended to check the global behavior of torque for various configurations of distribution of electric charge. The relationship between electrical torque and altitude of the satellite is also evaluated, since for lower altitudes the geomagnetic field is stronger and therefore of the interaction between this and the electric charge inherent in the artificial satellite. This analysis may be useful for satellite missions Brazilians, especially with regard to prediction and attitude control of satellites.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	7
LISTA DE TABELAS.....	8
LISTA DE SÍMBOLOS.....	9
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS.....	10
1 - INTRODUÇÃO.....	11
2 - DESENVOLVIMENTO.....	11
2.1 – Quatérnions.....	11
2.2 – Equações do Movimento Rotacional.....	12
2.3 – Torque devido à Força de Lorentz ou Torque elétrico.....	12
2.3.1 – Modelo Matemático para o Torque elétrico.....	13
2.3.2 – Componentes do Torque elétrico.....	13
3 – RESULTADOS.....	15
3.1 – Resultados para o Satélite SCD1 - Simulações com Atualização Diária dos Dados.....	15
3.1.1 – Resultados para Ascensão Reta, Declinação e Velocidade de Rotação.....	16
3.1.2 – Resultados para Magnitude do Torque Elétrico.....	23
3.2 – Resultados para o Satélite SCD1 - Simulações sem Atualização Diária dos Dados.....	29
3.3 – Resultados para o Satélite SCD2 - Simulações com Atualização Diária dos Dados.....	34
3.3.1 – Resultados para Ascensão Reta, Declinação e Velocidade de Rotação.....	34
3.3.2 – Resultados para Magnitude do Torque Elétrico.....	41
3.4 – Resultados para o Satélite SCD2 sem atualização diária dos dados.....	47
4 – CONCLUSÃO.....	50
5 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	51

LISTA DE FIGURAS

1 - Comportamento temporal da Ascensão Reta para SCD1 – Configuração 10.....	18
2 - Comportamento temporal da Declinação para SCD1 – Configuração 10.....	18
3 - Comportamento temporal da Velocidade de Rotação para SCD1 – Configuração 10.....	18
4 - Comportamento temporal dos Desvios para SCD1 – Configuração 10.....	18
5 - Comportamento temporal da Ascensão Reta para SCD1 – Configuração 6.....	20
6 - Comportamento temporal da Declinação para SCD1 – Configuração 6.....	20
7 - Comportamento temporal da Velocidade de Rotação para SCD1 – Configuração 6.....	20
8 - Comportamento temporal dos Desvios para SCD1 – Configuração 6.....	20
9 - Comportamento temporal da Ascensão Reta para SCD1	21
10 - Comportamento temporal da Declinação para SCD1	21
11 - Comportamento temporal da Velocidade de Rotação para SCD1	22
12 - Comportamento temporal do Desvio da Ascensão Reta para SCD1	22
13 - Comportamento temporal do Desvio da Declinação para SCD1	22
14 - Comportamento temporal do Desvio da Velocidade de Rotação para SCD1	23
15 - Comportamento temporal da Magnitude do Torque Elétrico – Configuração 4.....	24
16 - Comportamento temporal da Magnitude do Torque Elétrico – Configuração 10.....	24
17 - Comportamento temporal da Magnitude do Torque Elétrico.....	26
18 - Evolução Magnitude do Torque Elétrico durante um dia – Dia 1 – Configuração 1.....	27
19 - Desvio do TE em Função da Altura.....	28
20 - Magnitude do TE em função da Carga Elétrica.....	28
21 - Resultados da Ascensão Reta para o SCD1 Sem Atualização Diária dos Dados.....	30
22 - Resultados da Declinação para o SCD1 sem Atualização Diária dos Dados.....	31
23 - Resultados da Velocidade de Rotação para o SCD1 sem Atualização Diária dos Dados.....	31
24 - Resultados da Ascensão Reta para o SCD1 sem Atualização Diária dos Dados.....	32
25 - Resultados da Declinação para o SCD1 sem Atualização Diária dos Dados.....	32
26 - Resultados da Velocidade de Rotação para o SCD1 sem Atualização Diária dos Dados.....	33
27 - Comportamento temporal da Ascensão Reta para SCD2 – Configuração 7.....	36
28 - Comportamento temporal da Declinação para SCD2 – Configuração 7.....	36
29 - Comportamento temporal da Velocidade de Rotação para SCD2 – Configuração 7.....	36
30 - Comportamento temporal dos Desvios para SCD2 – Configuração 7.....	36
31 - Comportamento temporal da Ascensão Reta para SCD2 – Configuração 3.....	38
32 - Comportamento temporal da Declinação para SCD2 – Configuração 3.....	38
33 - Comportamento temporal da Velocidade de Rotação para SCD2 – Configuração 3.....	38
34 - Comportamento temporal dos Desvios para SCD2 – Configuração 3.....	38
35 - Comportamento temporal da Ascensão Reta para SCD2.....	39
36 - Comportamento temporal da Declinação para SCD2.....	39
37 - Comportamento temporal da Velocidade de Rotação para SCD2	40
38 - Comportamento temporal dos Desvios da Ascensão Reta para SCD2.....	40
39 - Comportamento temporal dos Desvios da Declinação para SCD2.....	40
40 - Comportamento temporal dos Desvios da Velocidade de Rotação para SCD2	41
41 - Comportamento Temporal da Magnitude do Torque Elétrico.....	43
42 - Variação da Magnitude do TE em Função da Altura – $Q = 1.10^{20} C$	44
43 - Desvios em Função da Altura – $Q = 1.10^{20} C$	44
44 - Variação da Magnitude do TE em Função da Altitude – $Q = 1.10^{20} C$	45
45 - Desvios em Função da Altitude – $Q = 1.10^{20} C$	46
46 - Variação da Magnitude do TE em Função do Diâmetro – $Q = 1.10^{20} C$	46
47 - Desvios em Função do Diâmetro – $Q = 1.10^{20} C$	47
48 - Resultados da Ascensão Reta para o SCD2 sem Atualização Diária dos Dados.....	49
49 - Resultados da Declinação para o SCD2 sem Atualização Diária dos Dados.....	49
50 - Resultados da Velocidade de Rotação para o SCD2 sem Atualização Diária dos Dados.....	49

LISTA DE TABELAS

1 - Configurações de Distribuição de Carga.	16
2 - Resultados para SCD1 com Atualização Diária dos Dados – Configuração 10.....	19
3 - Resultados para SCD1 com Atualização Diária dos Dados – Configuração 6.....	18
4 - Magnitudes do Torque Elétrico – Configurações Quatro e Dez.....	23
5 - Magnitudes do Torque Elétrico – Configurações 1 a 10 (exceto configuração 5 e 6) – SCD1.25	
6 - Evolução do TE durante o período de simulação Dia 1 – Configuração 1.....	26
7 - Variação da Magnitude do TE em função da Altura.....	27
8 - Variação da Magnitude do TE em função da Carga Elétrica.....	28
9 - Resultados para o SCD1 Sem Atualização Diária dos Dados - Configuração 4 – Dia 2	30
10 - Resultados para o SCD1 – Sem Atualização Diária dos Dados - Configuração 10 – Dia 8..	32
11 - Configurações de Distribuição de Carga.....	34
12 - Resultados para SCD2 com Atualização Diária dos Dados – Configuração 7.....	35
13 - Resultados para SCD2 com Atualização Diária dos Dados – Configuração 3.....	37
14 - Magnitudes do Torque Elétrico – Configurações 1 a 9 – SCD2	42
15 - Variação da Magnitude do TE em função da Altura.....	43
16 - Variação da Magnitude do TE em função da Altitude.....	45
17 - Variação da Magnitude do TE em função do Diâmetro.....	46
18 - Resultados para o SCD2 Sem Atualização Diária dos Dados - Configuração 9 – Dia 1.....	48

LISTA DE SÍMBOLOS

\vec{B}	- campo magnético terrestre local
\vec{F}_L	- força de Lorentz
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
\vec{M}_L	- torque elétrico
O	- centro de massa do Satélite
O'	- centro de massa da Terra
O'x _m y _m z _m	- Sistema Magnético
OXYZ	- Sistema Equatorial
Oxyz	- Sistema do Satélite
OZ	- eixo de maior momento principal de inércia
O'XYZ	- Sistema Inercial
p, q e r	- componentes da velocidade de rotação no sistema do satélite
q _i	- quatérnion de atitude
Q	- carga elétrica
R _T	- raio equatorial da Terra
\vec{r}	- vetor posição do centro de massa do satélite ao centro de massa da Terra
V	- velocidade de translação
W	- módulo da velocidade de rotação
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
\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

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

- UNESP - Universidade Estadual Paulista
- CRC - Centro de Rastreo e Controle
- INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
- SCD1 - Primeiro Satélite de Coleta de Dados Brasileiro
- SCD2 - Segundo Satélite de Coleta de Dados Brasileiro
- TE - Torque Elétrico

1 INTRODUÇÃO

O objetivo deste projeto é realizar um estudo preliminar sobre a influência do torque devido à força de Lorentz (torque elétrico) no movimento rotacional de satélites artificiais através da integração numérica das equações dinâmicas em termos das componentes da velocidade de rotação e das equações cinemáticas, representadas em termos dos quatérnions de atitude (Shuster, 1993). Nestas simulações as componentes do torque elétrico são substituídas nas equações do movimento rotacional do satélite e estas são integradas de modo a obter o comportamento da evolução temporal das variáveis envolvidas.

As simulações numéricas permitem realizar previsões da evolução futura da atitude e da velocidade de rotação do satélite. Daí sua grande importância nas áreas científica e tecnológica, em que vem sendo utilizada largamente. Geralmente essas aplicações envolvem equações diferenciais de grande complexidade, que muitas vezes são impossíveis de serem resolvidas analiticamente, tornando indispensável o uso de um método de integração numérica.

Neste trabalho o sistema diferencial a ser integrado é não-linear de primeira ordem com sete equações e sete incógnitas e para tanto é utilizado o método numérico de Runge-Kutta de oitava ordem. O uso de ordem elevada garante uma maior precisão para o processo de integração. As aplicações são realizadas para os satélites brasileiros de coleta de dados ambientais SCD1 e SCD2, e os resultados são apresentados em termos dos ângulos de ascensão reta (α) e declinação (δ) do eixo de rotação e da magnitude da velocidade de rotação (W).

2 DESENVOLVIMENTO

As equações do movimento rotacional do satélite integradas neste projeto são dadas através dos quatérnions de atitude, como dito anteriormente. Estes conceitos são apresentados a seguir.

2.1 Quatérnions

Se ϕ é o ângulo de rotação e $\hat{n} = (n_1 \ n_2 \ n_3)^t$ é o vetor unitário ao longo do eixo de rotação, com t indicando a transposta da matriz, o quatérnion de rotação é um vetor (4x1) definido por (Wertz, 1978; Pisacane e Moore, 1994; Zanardi, 2005):

$$q = (\bar{q} \ q_4)^t = (q_1 \ q_2 \ q_3 \ q_4)^t \quad (1)$$

onde $\bar{q} = (q_1 \ q_2 \ q_3)^t$ representa a parte vetorial do quatérnion e q_4 a parte escalar, sendo:

$$\begin{aligned} q_1 &= n_1 \operatorname{sen}\left(\frac{\phi}{2}\right) & q_2 &= n_2 \operatorname{sen}\left(\frac{\phi}{2}\right) \\ q_3 &= n_3 \operatorname{sen}\left(\frac{\phi}{2}\right) & q_4 &= \cos\left(\frac{\phi}{2}\right) \end{aligned} \quad (2)$$

Várias propriedades do quatérnion encontram-se em Shuster (1993), dentre as quais destaca-se que o Módulo do quatérnion é igual à unidade, ou seja:

$$q_1^2 + q_2^2 + q_3^2 + q_4^2 = 1 \quad (3)$$

2.2 Equações do Movimento Rotacional

As equações do movimento rotacional são dadas pelas equações dinâmicas e cinemáticas apresentadas a seguir.

Equações Dinâmicas

As equações dinâmicas do movimento rotacional de satélites artificiais descritas no Sistema do Satélite (Oxyz), são dadas por (Zanardi, 2005):

$$\begin{aligned}I_x \dot{p} &= M_x + (I_y - I_z) q r \\I_y \dot{q} &= M_y + (I_z - I_x) p r \\I_z \dot{r} &= M_z + (I_x - I_y) p q\end{aligned}\tag{4}$$

onde I_x , I_y e I_z são os momentos principais de inércia do satélite; p , q e r são as componentes da velocidade de rotação no sistema do satélite (com eixos paralelos aos eixos principais de inércia do satélite); M_x , M_y , M_z são componentes dos torques externos no sistema do satélite.

Equações Cinemáticas

As taxas de variação de cada componente do quatérnion são dadas pelas equações cinemáticas (Zanardi, 2005):

$$\begin{aligned}\dot{q}_1 &= \frac{1}{2} \cdot (p \cdot q_4 - q \cdot q_3 + r \cdot q_2) & \dot{q}_2 &= \frac{1}{2} \cdot (q \cdot q_4 - r \cdot q_1 + p \cdot q_3) \\ \dot{q}_3 &= \frac{1}{2} \cdot (r \cdot q_4 - p \cdot q_2 + q \cdot q_1) & \dot{q}_4 &= \frac{1}{2} \cdot (p \cdot q_1 + q \cdot q_2 + r \cdot q_3)\end{aligned}\tag{5}$$

2.3 Torque devido à Força de Lorentz ou Torque Elétrico

Muitas análises já foram realizadas para avaliar os efeitos da força de Lorentz e mostraram que em princípio esta força possui um valor negligenciável em comparação com as demais forças externas (Sehnal, 1969). Entretanto, a necessidade de uma alta precisão nos resultados de experimentos em algumas missões espaciais requer um conhecimento claro do efeito eletrodinâmico devido à força de Lorentz no movimento rotacional do veículo espacial. Esse efeito será estudado com detalhes neste projeto. A carga elétrica do satélite é a grandeza mais importante na determinação da magnitude do efeito da força de Lorentz. A superfície do satélite é carregada com um potencial negativo e em primeira aproximação comporta-se como um capacitor esférico para a vizinhança ao redor. Deve se levar também em consideração a importância da missão e a configuração do satélite.

A imposição de grandes potenciais no satélite aumenta a contaminação da superfície do satélite, a qual degrada suas propriedades térmicas. O aumento do potencial ainda pode produzir uma diferença de potencial na superfície do satélite ou entre a superfície do satélite e o interior do mesmo acima do limite de ruptura. Quando este limite é excedido, uma descarga eletrostática pode ocorrer e o veículo espacial pode oscilar ou cambaleiar (Purvis et al., 1984).

2.3.1 Modelo Matemático para o Torque Elétrico

O modelo para o torque devido à força de Lorentz depende da velocidade de rotação do satélite, da velocidade de rotação diurna do campo geomagnético e da Terra e de características físicas e de inércia da blindagem de proteção, que define a carga elétrica do satélite. Neste projeto é considerado que a carga elétrica do satélite é constante e que o campo geomagnético é descrito pelo modelo de vetor de dipolo.

A força de Lorentz é dada por (Sehnal, 1969):

$$\vec{F}_L = Q\vec{V} \times \vec{B} \quad (6)$$

sendo Q 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 direção $\hat{\beta}$ é definida pelo modelo de vetor de dipolo.

O modelo a ser utilizado neste projeto para o torque devido à força de Lorentz é o mesmo utilizado por Abdel-Aziz (2007) e dado por (Beletskii e Khentov, 1985):

$$\vec{M}_L = \vec{W} \times \vec{\beta}_s + \vec{w}_g \times \vec{\beta}_s \quad (7)$$

sendo: \vec{W} a velocidade de rotação do satélite; \vec{w}_g vetor velocidade de rotação diurna do campo geomagnético junto com a Terra, cuja direção é também dada pelo versor $\hat{\beta}$, e

$$\vec{\beta}_s = S\hat{\beta} \quad (8)$$

com S sendo a matriz de uma manta cilíndrica carregada, dada por (Beletskii e Khentov, 1985):

$$S = \begin{pmatrix} 4Dd^2 & 0 & 0 \\ 0 & 4Dd^2 & 0 \\ 0 & 0 & 4Dh^2 \end{pmatrix} \quad (9)$$

onde $D = \frac{QB}{4r'^3}$, com B sendo a magnitude do campo geomagnético, r' a distância geocêntrica do satélite, d e h o diâmetro e o comprimento da manta cilíndrica carregada que envolve o satélite, onde idealmente a carga é depositada uniformemente.

Uma vez determinadas as componentes do torque devido à força de Lorentz \vec{M}_L , a partir de (7), no sistema do satélite, tais componentes são substituídas nas equações dinâmicas (4) e essas equações são integradas para se determinar a influência do torque elétrico e compará-la com as influências dos outros torques.

2.3.2 Componentes do Torque elétrico

Nas equações do movimento rotacional são necessárias as componentes do torque elétrico no sistema do satélite:

$$\vec{M}_L = M_{L1}\hat{i} + M_{L2}\hat{j} + M_{L3}\hat{k} \quad (10)$$

Para a determinação das componentes do torque elétrico parte-se de (7), com:

$\hat{\beta} = (\beta_1 \ \beta_2 \ \beta_3)^t$ - dado no sistema equatorial.

$\vec{w}_g = w_g (\beta_1 \ \beta_2 \ \beta_3)^t$ - dado no sistema equatorial.

$\vec{W} = (p \ q \ r)^t$ - dado no sistema principal do satélite.

As componentes do vetor $\hat{\beta}$ no sistema principal do satélite foram determinadas no projeto anterior do bolsista (Bento, 2009), utilizando a matriz de rotação envolvendo quatérnions, sendo dadas por:

$$\beta_{1P} = (q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 + q_4^2)\beta_1 + 2(q_1q_2 + q_4q_3)\beta_2 + 2(q_1q_3 - q_4q_2)\beta_3 \quad (11)$$

$$\beta_{2P} = 2(q_1q_2 - q_4q_3)\beta_1 + (-q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 + q_4^2)\beta_2 + 2(q_1q_3 + q_4q_2)\beta_3 \quad (12)$$

$$\beta_{3P} = 2(q_1q_3 + q_4q_2)\beta_1 + 2(q_1q_2 - q_4q_3)\beta_2 + (-q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 + q_4^2)\beta_3 \quad (13)$$

Do mesmo modo, as componentes do torque elétrico foram determinadas do projeto anterior do bolsista, e são apresentadas como (Bento, 2009):

$$M_{1L} = Dh^2\beta_{3P}(q + w_g\beta_{2P}) - Dd^2\beta_{2P}(r + w_g\beta_{3P}) \quad (14)$$

$$M_{2L} = Dd^2\beta_{1P}(r + w_g\beta_{3P}) - Dh^2\beta_{3P}(p + w_g\beta_{1P}) \quad (15)$$

$$M_{3L} = Dd^2(p\beta_{2P} - q\beta_{1P}) \quad (16)$$

3 RESULTADOS

A partir dos resultados apresentados neste trabalho pretende-se determinar o comportamento do torque elétrico e de seu efeito sobre o movimento rotacional de satélites artificiais de acordo com a configuração de distribuição e intensidade de carga elétrica no satélite. Serão verificadas também a relação de tal torque com a altitude do satélite.

Os resultados a seguir representam as simulações executadas a cada variação nos parâmetros das componentes do torque elétrico aos quais tem-se acesso. O integrador simula a ação do torque sobre o movimento rotacional do satélite por um período de 17 dias para o Satélite de Coleta de Dados Brasileiro 1 - SCD1 – e 16 dias para o Satélite de Coleta de Dados Brasileiro 2 – SCD2.

São realizadas também algumas simulações numéricas para um dos três satélites da série PEGASUS, o PEGASUS A, com intuito de se analisar o efeito do TE em um satélite de maiores dimensões.

O conjunto de simulações tem o propósito de comparar os desvios causados pelo torque a partir da variação da carga elétrica do satélite, da altura e diâmetro da casca cilíndrica - onde idealmente esta carga está depositada -, na ascensão reta, declinação e velocidade de rotação.

A análise dos resultados é feita através da comparação dos resultados da propagação com os dados reais do satélite fornecidos pelo CRC/INPE. Neste processo utiliza-se a média dos erros de propagação, pois no caso da propagação sem atualização dos dados, ela é utilizada como parâmetro para determinar o intervalo de validade da abordagem realizada. Este intervalo está associado ao período de simulação em que as precisões se mantêm menores que 0,1 rpm para a velocidade de rotação e que 0,5° para a média do erro em ascensão e declinação do eixo de rotação, valores estes que satisfazem aos requisitos operacionais do CCS/INPE para as missões dos satélites SCD1 e SCD2

3.1 Resultados para o Satélite SCD1 - Simulações com Atualização Diária dos Dados

Para tais simulações, a cada período de 24 horas de integração, os dados são atualizados com os valores reais fornecidos pelo CRC/INPE.

Os resultados estão apresentados em forma de tabelas e gráficos. As tabelas apresentam os valores reais fornecidos pelo CRC/INPE e os resultados obtidos nas simulações a cada 24 horas para a ascensão reta (α) e declinação (δ) do eixo de rotação do satélite e velocidade de rotação do satélite (W), indicando também os desvios entre estes dois valores.

A Tabela 1 abaixo representa as diversas configurações de carga e altura da casca cilíndrica carregada, utilizadas nas simulações.

Tabela 1 – Configurações de Distribuição de Carga

Configuração	Carga Q [C]	Altura h [m]
1	1,00	0,01
2	1,00	0,10
3	1,00	0,50
4	1,00	1,00
5	1,00	1,50
6	1,00	2,00
7	1,00E-3	1,00
8	1,00E-6	1,00
9	1,00E-9	1,00
10	1,00E-12	1,00

Para cada uma dessas combinações de parâmetros, mantendo-se o diâmetro da casca cilíndrica em $d = 1,00$ m, realizam-se as simulações para um período de 17 dias.

A partir do modelo obtido para o TE, a configuração 10 deve ser aquela a apresentar menores intensidades de torque enquanto que a configuração 6 apresentará as maiores magnitudes. São então apresentados, antes dos demais resultados, os resultados para estes dois casos em particular.

3.1.1 Resultados para Ascensão Reta, Declinação e Velocidade de Rotação

Para a configuração 10 os resultados estão apresentados na Tabela 2, em conjunto com as Figuras 1 a 3. As Figuras e Tabelas apresentam os comportamentos temporais dos ângulos de ascensão reta e declinação do eixo de rotação do satélite e da magnitude da velocidade de rotação. Na Figura 4 apresenta-se a curva de evolução do desvio entre os valores reais e valores obtidos a partir das simulações para as s variáveis citadas.

Tabela 2 – Resultados para SCD1 com Atualização Diária dos Dados – Configuração 10

Dias	Valores Reais			Dias	Valores Simulados			
	Ascensão Reta [°]	Declinação [°]	Velocidade de Rotação [rpm]		Ascensão Reta [°]	Declinação [°]	Velocidade de Rotação [rpm]	Torque Elétrico [10^{-39} N.m]
17/08/93	280,09	81,1	87,06	17/08/93	280,09	81,1	87,06	-
18/08/93	281,01	80,82	86,88	18/08/93	280,0900035579790	81,0999984741232	87,0599975585938	15,4114519368247
19/08/93	281,74	80,53	86,71	19/08/93	281,0100197835390	80,8199996948195	86,8799972534179	24,0982479124544
20/08/93	282,24	80,23	86,54	20/08/93	281,7400002522880	80,5299987792935	86,7099990844727	22,6733241380993
21/08/93	282,57	79,93	86,37	21/08/93	282,2400002522870	80,2300033569358	86,5400009155273	2,59792859266406
22/08/93	282,7	79,64	86,21	22/08/93	282,5700173421400	79,9300003051736	86,3700027465820	24,8824398532910
23/08/93	282,67	79,35	86,04	23/08/93	282,7000222249530	79,6399993896469	86,2099990844727	26,8298766300675
24/08/93	283,5	79,22	85,88	24/08/93	282,6700234456470	79,3499984741222	86,0400009155273	12,6729831376011
25/08/93	283,01	78,95	85,8	25/08/93	283,5000100179090	79,2200012207058	85,8799972534180	2,34160289359711
26/08/93	282,43	78,7	85,73	26/08/93	283,0100197835310	78,9499969482433	85,8000030517578	25,9985856264757
27/08/93	281,01	78,7	85,58	27/08/93	282,4300026936900	78,6999969482455	85,7300033569335	5,43534747641020
28/08/93	281,01	78,27	85,58	28/08/93	281,0100197835250	78,6999969482400	85,5800018310547	11,1095991838403
29/08/93	280,18	78,08	85,51	29/08/93	281,0100197835940	78,2699966430629	85,5800018310547	10,1468178155319
30/08/93	279,29	77,91	85,44	30/08/93	280,1800026936950	78,0800018310600	85,5100021362305	16,8669093185624
31/08/93	278,34	77,78	85,37	31/08/93	279,2900185628330	77,9100036621076	85,4400024414063	22,7581812769466
01/09/93	277,36	77,67	85,31	01/09/93	278,3400063557990	77,7799987792952	85,3700027465820	1,57667857533041
02/09/93	276,34	77,58	85,24	02/09/93	277,3599953694790	77,6699981689464	85,3099975585938	9,53467516829361
				03/09/93	276,3400063557960	77,5800018310550	85,2399978637695	22,5640476049991

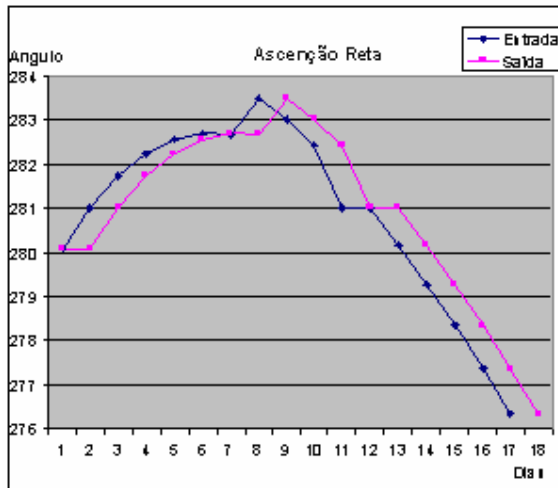


Figura 1 – Comportamento temporal da Ascensão Reta para SCD1 – Configuração 10

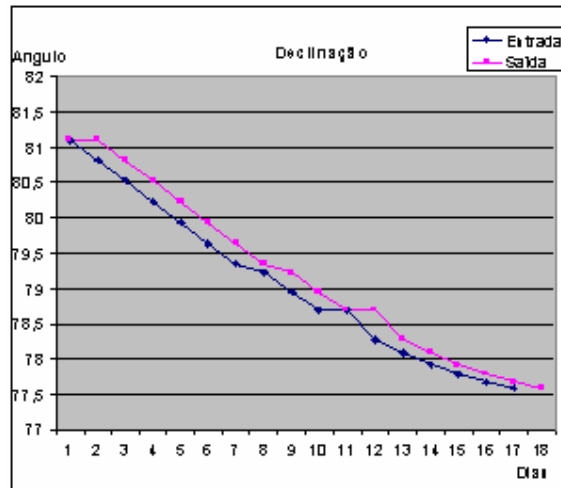


Figura 2 – Comportamento temporal da Declinação para SCD1 – Configuração 10

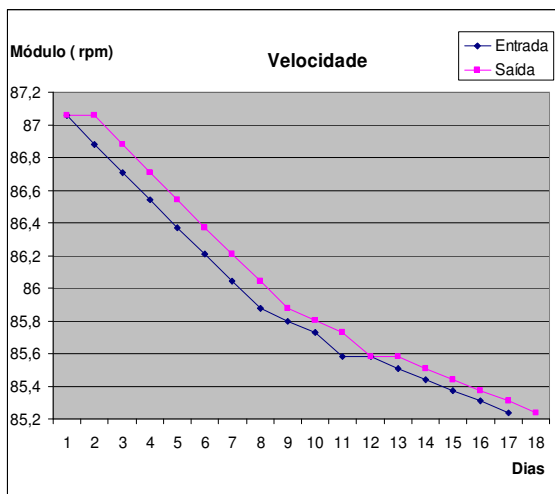


Figura 3 – Comportamento temporal da Velocidade de Rotação para SCD1 – Configuração 10

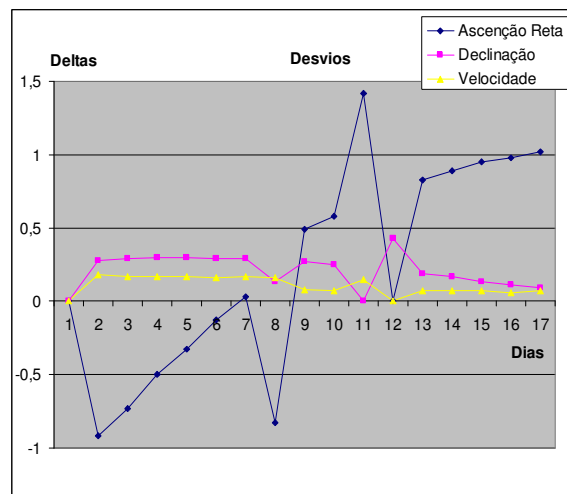


Figura 4 – Comportamento temporal dos Desvios para SCD1 – Configuração 10

A média e desvio padrão dos desvios para ascensão reta, declinação e velocidade de rotação foram, respectivamente, $\Delta\alpha = (0,234386369 \pm 0,75468081)^\circ$, $\Delta\delta = (0,219999352 \pm 0,10819749)^\circ$ e $\Delta W = (0,11375061 \pm 0,057255979) \text{ rpm}$.

É importante ressaltar que apesar de haver uma linha conectando os pontos nos gráficos representados, tais dados são gerados ao final de cada simulação de 24 horas, sendo assim discretos. Pode haver valores intermediários entre um dia que não são representados.

Para a configuração 6 os resultados estão apresentados na Tabela 3, em conjunto com as Figuras 5 a 7. As Figuras e Tabelas apresentam os comportamentos temporais dos ângulos de ascensão reta e declinação do eixo de rotação do satélite e da magnitude da velocidade de rotação. Na Figura 8 apresenta-se a curva de evolução do desvio entre os valores reais e valores obtidos a partir das simulações para as s variáveis citadas.

Tabela 3 – Resultados para SCD1 com Atualização Diária dos Dados – Configuração 6

Dias	Valores Reais			Dias	Valores Simulados			
	Ascensão Reta [°]	Declinação [°]	Velocidade de Rotação [rpm]		Ascensão Reta [°]	Declinação [°]	Velocidade de Rotação [rpm]	Torque Elétrico [10 ⁻³⁹ N.m]
17/08/93	280,09	81,1	87,06	17/08/93	280,09	81,1	87,06	-
18/08/93	281,01	80,82	86,88	18/08/93	280,0900035579790	81,0999984741232	87,0599975585938	15,4114519368247
19/08/93	281,74	80,53	86,71	19/08/93	281,0100197835390	80,8199996948195	86,8799972534179	24,0982479124544
20/08/93	282,24	80,23	86,54	20/08/93	281,7400002522880	80,5299987792935	86,7099990844727	22,6733241380993
21/08/93	282,57	79,93	86,37	21/08/93	282,2400002522870	80,2300033569358	86,5400009155273	2,59792859266406
22/08/93	282,7	79,64	86,21	22/08/93	282,5700173421400	79,9300003051736	86,3700027465820	24,8824398532910
23/08/93	282,67	79,35	86,04	23/08/93	282,700022249530	79,6399993896469	86,2099990844727	26,8298766300675
24/08/93	283,5	79,22	85,88	24/08/93	282,6700234456470	79,3499984741222	86,0400009155273	12,6729831376011
25/08/93	283,01	78,95	85,8	25/08/93	283,5000100179090	79,2200012207058	85,8799972534180	2,34160289359711
26/08/93	282,43	78,7	85,73	26/08/93	283,0100197835310	78,9499969482433	85,8000030517578	25,9985856264757
27/08/93	281,01	78,7	85,58	27/08/93	282,4300026936900	78,6999969482455	85,7300033569335	5,43534747641020
28/08/93	281,01	78,27	85,58	28/08/93	281,0100197835250	78,6999969482400	85,5800018310547	11,1095991838403
29/08/93	280,18	78,08	85,51	29/08/93	281,0100197835940	78,2699966430629	85,5800018310547	10,1468178155319
30/08/93	279,29	77,91	85,44	30/08/93	280,1800026936950	78,0800018310600	85,5100021362305	16,8669093185624
31/08/93	278,34	77,78	85,37	31/08/93	279,2900185628330	77,9100036621076	85,4400024414063	22,7581812769466
01/09/93	277,36	77,67	85,31	01/09/93	278,3400063557990	77,7799987792952	85,3700027465820	1,57667857533041
02/09/93	276,34	77,58	85,24	02/09/93	277,3599953694790	77,6699981689464	85,3099975585938	9,53467516829361
				03/09/93	276,3400063557960	77,5800018310550	85,2399978637695	22,5640476049991

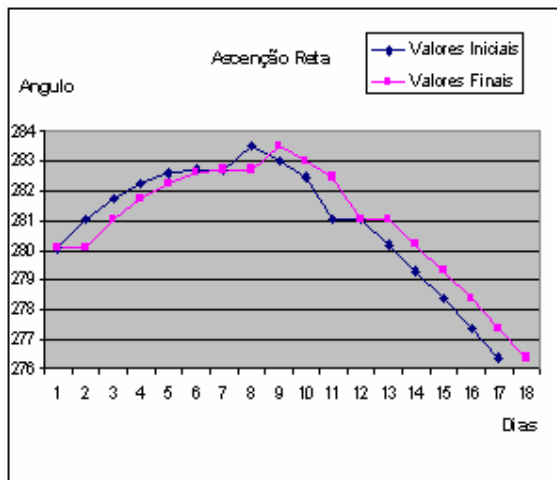


Figura 5 – Comportamento temporal da Ascensão Reta para SCD1 – Configuração 6

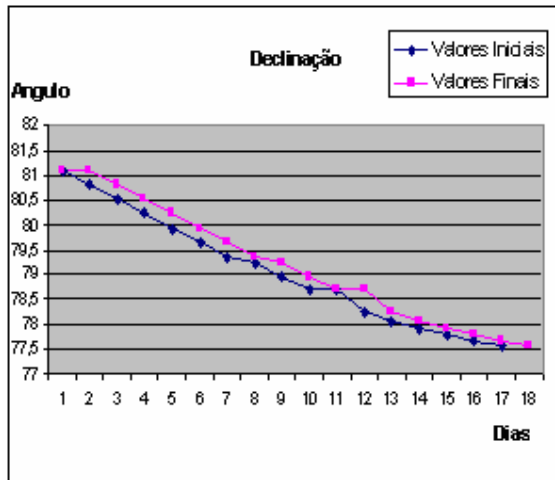


Figura 6 – Comportamento temporal da Declinação para SCD1 – Configuração 6

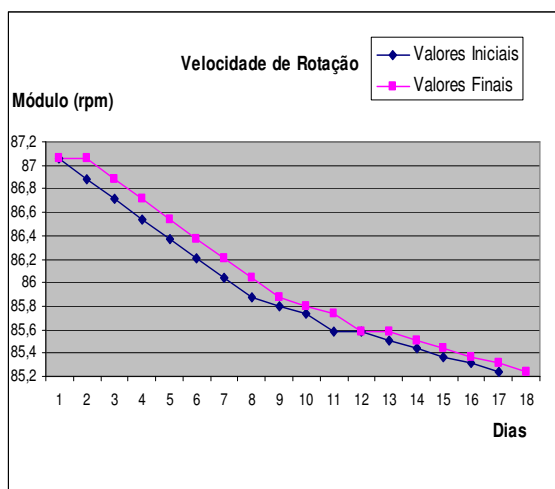


Figura 7 – Comportamento temporal da Velocidade de Rotação para SCD1 – Configuração 6

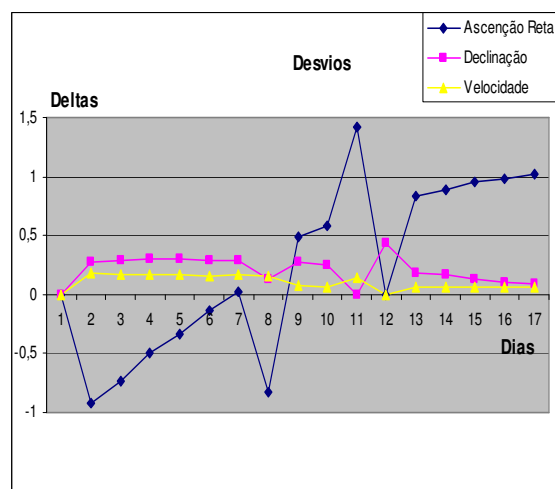


Figura 8 – Comportamento temporal dos Desvios para SCD1 – Configuração 6

A média e desvio padrão dos desvios para ascensão reta, declinação e velocidade de rotação foram, respectivamente, $\Delta\alpha = (0,234386544 \pm 0,73292419)^\circ$, $\Delta\delta = (0,219999352 \pm 0,11756730)^\circ$ e $\Delta W = (0,113750610 \pm 0,06192323) \text{ rpm}$.

Observa-se que os desvios para a configuração 6 – com maior intensidade de torque - foram praticamente os mesmos apresentados para a configuração 10, onde o TE apresentou sua menor magnitude.

Tal resultado é esperado e se deve ao fato da baixa magnitude do torque. Para a configuração 10 a intensidade média do TE foi $\overline{TE} = (1,514698218 \pm 0,89464203) \cdot 10^{-38} \text{ N.m}$, enquanto que para a configuração 6 foi $\overline{TE} = (1,514698226 \pm 0,89464204) \cdot 10^{-26} \text{ N.m}$.

Observa-se que mesmo para uma variação da ordem 10^{12} na magnitude do TE, causada principalmente pela variação na ordem de grandeza da carga elétrica, a ordem de grandeza do TE é ainda muito pequena. Fica também evidente que os valores obtidos nas médias dos torques,

desconsiderando-se as ordens de grandeza são bastante similares, evidenciando, portanto, que a altura – que variou em 100% – não provoca um desvio tão significativo neste quanto a variação da carga elétrica – que provocou no TE uma variação praticamente linear na intensidade do TE. Tal comportamento ficará mais evidente a partir de outros resultados descritos neste relatório.

Os resultados com os comportamentos temporais dos ângulos de ascensão reta, declinação, do módulo da velocidade de rotação do satélite e dos desvios entre os valores simulados e os valores reais, para as diferentes configurações descritas mostram-se bastante análogos, pelos motivos apresentados anteriormente. Estes são apresentados em conjunto nas Figuras 9 a 14.

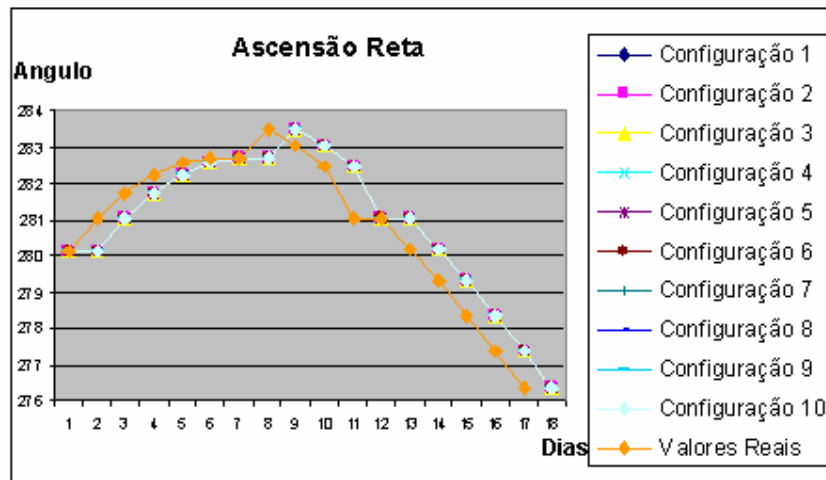


Figura 9 – Comportamento temporal da Ascensão Reta para SCD1

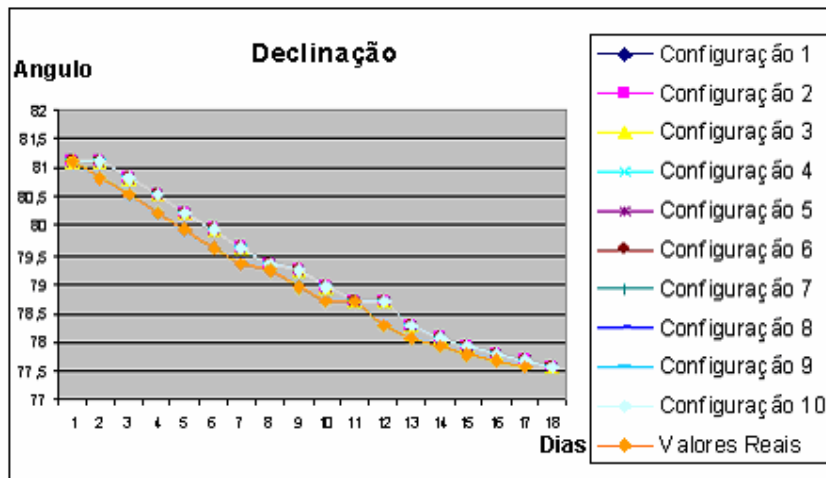


Figura 10 – Comportamento temporal da Declinação para SCD1

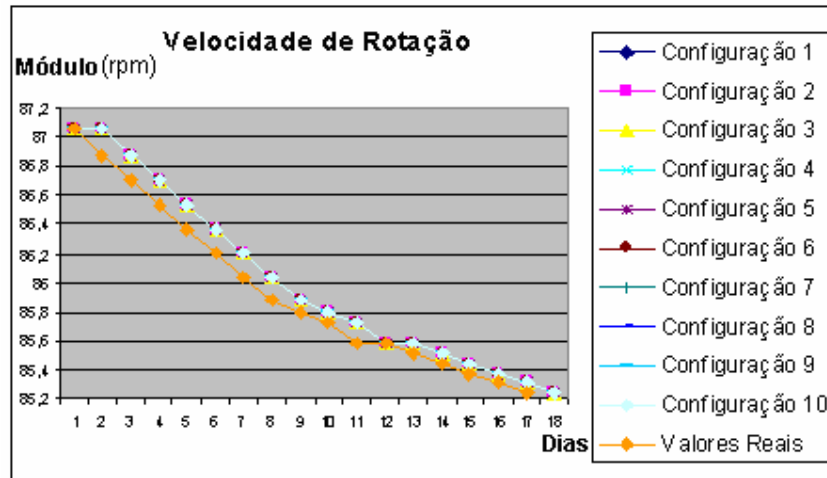


Figura 11 – Comportamento temporal da Velocidade de Rotação para SCD1

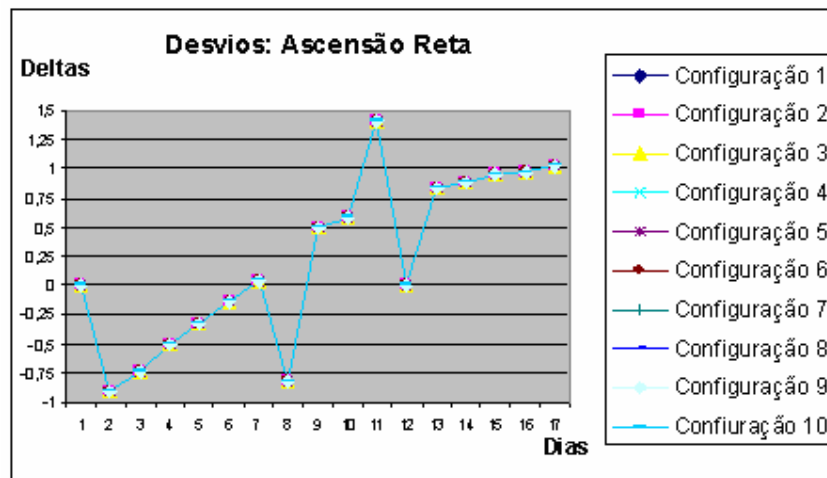


Figura 12 – Comportamento temporal do Desvio da Ascensão Reta para SCD1

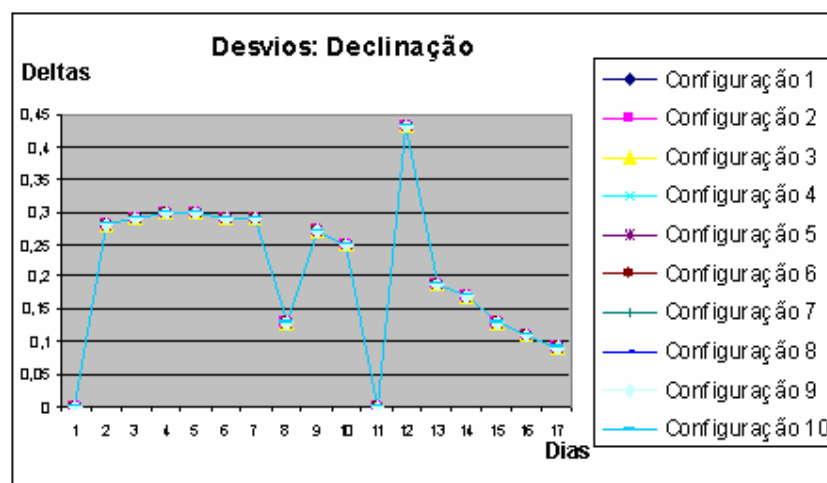


Figura 13 – Comportamento temporal Desvio da Declinação para SCD1

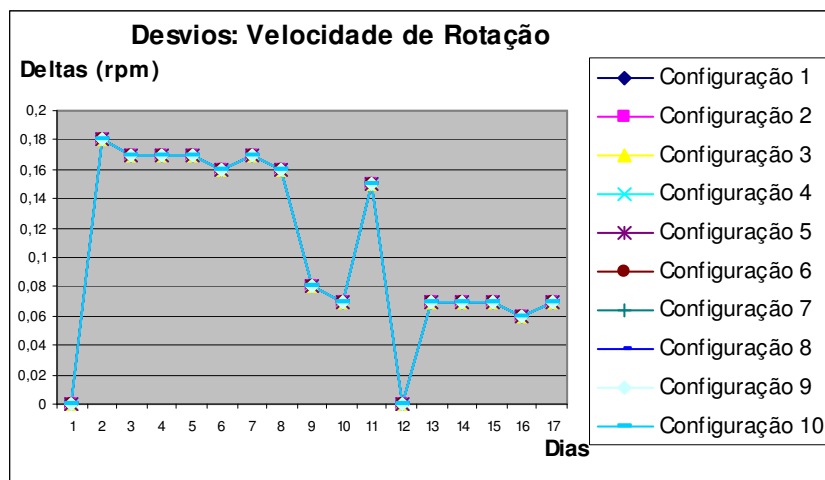


Figura 14 – Comportamento temporal do Desvio da Velocidade de Rotação para SCD1

Através das curvas representadas nos gráficos fica evidente que apesar das variações na intensidade do torque, esta se mantém ainda muito baixa, não causando assim variações significativas entre uma configuração e outra.

Como a intensidade do torque é baixa, os desvios nada mais representam que a diferença nos valores das variáveis entre um dia e o dia seguinte, já que a ação de tal torque não provoca variações significativas nas variáveis monitoradas.

3.1.2 Resultados para Magnitude do Torque Elétrico

O resultado das simulações apresentado a seguir tem o intuito de se obter o comportamento temporal da magnitude do TE. A Tabela 4 em conjunto com as Figuras 15 e 16 representa tais resultados para as configurações 4 e 10.

Tabela 4 – Magnitudes do Torque Elétrico – Configurações Quatro e Dez

Dia	TE – Configuração 4 - [10^{-27} N.m]	TE – Configuração 10 - [10^{-39} N.m]
17/08/93	-	-
18/08/93	15,4114519998406	15,4114519368247
19/08/93	24,0982480087463	24,0982479124544
20/08/93	22,6733242286974	22,6733241380993
21/08/93	2,59792860304487	2,59792859266406
22/08/93	24,8824399527163	24,8824398532910
23/08/93	26,8298767372744	26,8298766300675
24/08/93	12,6729831882398	12,6729831376011
25/08/93	2,34160290295369	2,34160289359711
26/08/93	25,9985857303609	25,9985856264757
27/08/93	5,43534749812878	5,43534747641020
28/08/93	11,1095992282320	11,1095991838403
29/08/93	10,1468178560766	10,1468178155319
30/08/93	16,8669096145485	16,8669093185624
31/08/93	22,7581813678838	22,7581812769466
01/09/93	1,57667858163051	1,57667857533041
02/09/93	9,53467520498309	9,53467516829361
03/09/93	22,5640476951605	22,5640476049991

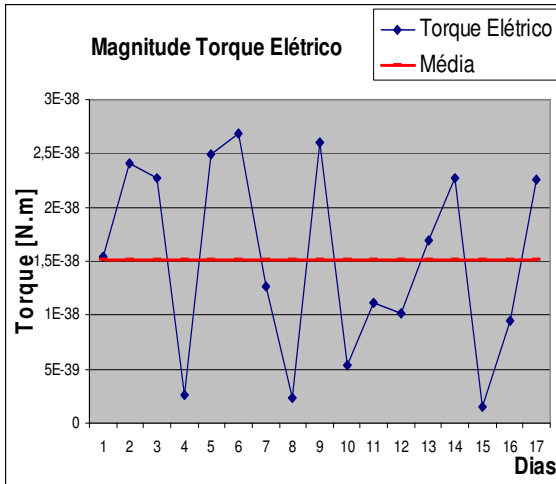


Figura 15 – Comportamento temporal da Magnitude do Torque Elétrico – Configuração 4

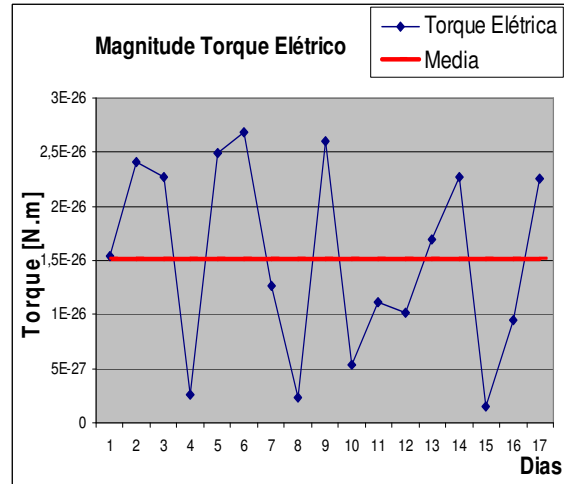


Figura 16 – Comportamento temporal da Magnitude do Torque Elétrica – Configuração 10

Através destes gráficos é possível observar que a intensidade do torque varia de forma semelhante com o passar dos dias isto é, os valores obtidos para o TE desconsiderando-se a ordem de grandeza são bastante similares. Tal fato evidencia a dependência do TE dos elementos orbitais do satélite e de sua atitude – descrita pela ascensão reta, declinação e velocidade de rotação – além, é claro, dos parâmetros do próprio torque. Observa-se também, a partir dos gráficos acima, a linearidade existente entre a intensidade do TE e a carga elétrica depositada no satélite.

São plotadas as curvas com o comportamento temporal da magnitude do TE para as demais configurações de distribuição de carga. A Tabela 5 abaixo apresenta os valores da magnitude do TE para as diversas configurações de distribuição de carga elétrica, e estas são representadas graficamente na Figura 17.

Tabela 5 – Magnitudes do Torque Elétrico – Configurações 1 a 10 (exceto configuração 5 e 6) – SCD1

Dia	TE Configuração 1 [10 ⁻²⁷ N.m]	TE Configuração 2 [10 ⁻²⁷ N.m]	TE Configuração 3 [10 ⁻²⁷ N.m]	TE Configuração 4 [10 ⁻²⁷ N.m]	TE Configuração 7 [10 ⁻³⁰ N.m]	TE Configuração 8 [10 ⁻³³ N.m]	TE Configuração 9 [10 ⁻³⁶ N.m]	TE Configuração 10 [10 ⁻³⁹ N.m]
17/8/93	15,4114519973890	15,4114519973891	15,4114519974526	15,4114519998406	15,4114527304105	15,4114519594957	15,4114515625402	15,4114519368247
18/8/93	24,0982480085338	24,0982480085339	24,0982480085471	24,0982480087463	24,0982491533516	24,0982479479041	24,0982473272013	24,0982479124544
19/8/93	22,6733242283838	22,6733242283838	22,6733242284034	22,6733242286974	22,6733253056226	22,6733241714528	22,6733235874520	22,6733241380993
20/8/93	2,59792859430078	2,59792859430166	2,59792859484729	2,59792860304487	2,59792872643985	2,59792859648573	2,59792852957043	2,59792859266406
21/8/93	24,8824399525772	24,8824399525772	24,8824399525859	24,8824399527163	24,8824411345688	24,8824398898942	24,8824392489928	24,8824398532910
22/8/93	26,8298767372743	26,8298767372743	26,8298767372743	26,8298767372744	26,8298780116251	26,8298766695354	26,8298759784736	26,8298766300675E
23/8/93	12,6729831868826	12,6729831868828	12,6729831869674	12,6729831882398	12,6729837901742	12,6729831562436	12,6729828298234	12,6729831376011
24/8/93	2,34160289333412	2,34160289333508	2,34160289393534	2,34160290295369	2,34160301417386	2,34160289704171	2,34160283672864	2,34160289359711
25/8/93	25,9985857303320	25,9985857303320	25,9985857303340	25,9985857303609	25,9985869652274	25,9985856647208	25,9985849950707	25,9985856264757
26/8/93	5,43534749433569	5,43534749433607	5,43534749457276	5,43534749812878	5,43534775629393	5,43534748440585	5,43534775629393	5,43534747641020
27/8/93	11,1095992267348	11,1095992267349	11,1095992268283	11,1095992282320	11,1095997559097	11,1095992001830	1,11095997559097	11,1095991838403
28/8/93	10,1468178544049	10,1468178544051	10,1468178545094	10,1468178560766	10,1468183380245	10,1468178304583	1,01468175691049	10,1468178155319
29/8/93	16,8669096139307	16,8669096139307	16,8669096139693	16,8669096145485	16,8669104156837	16,8669095719636	1,68669091375197	16,8669093185624
30/8/93	22,7581813677894	22,7581813677894	22,7581813677953	22,7581813678838	22,7581824488394	22,7581813104249	22,7581807242385	22,7581812769466
31/8/93	1,57667857024616	1,57667857024730	1,57667857095768	1,57667858163051	1,57667865651872	1,57667857764978	1,57667853703899	1,57667857533041
1/9/93	9,53467520488914	9,53467520488929	9,53467520498309	9,53467520498309	9,53467565926506	9,53467518231955	9,53467493673326	9,53467516829361
2/9/93	22,5640476951605	22,5640476951605	22,5640476951605	22,5640476951605	22,5640487668953	22,5640476381918	22,5640487668953	22,5640476049991
MÉDIA	15,1469822562646	15,1469822562649	15,1469822564190	15,1469822587364	15,1469829781779	15,1469822204924	15,1469820046816	15,1469821847641

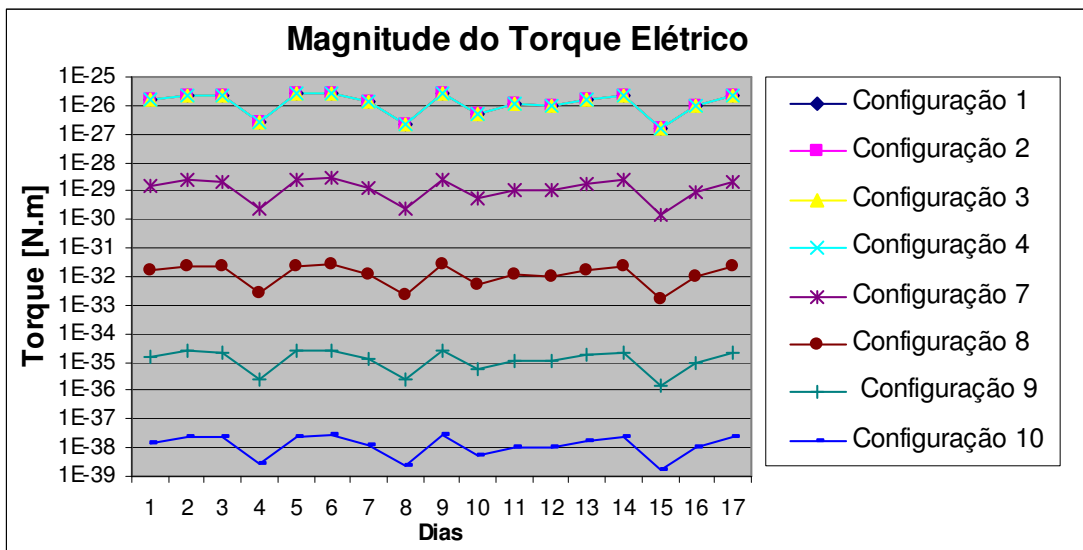


Figura 17 – Comportamento Temporal da Magnitude do Torque Elétrico

Mais uma vez pode ser observado como as variações no TE seguem uma espécie de curva padrão, independente de sua ordem de grandeza, com o passar dos dias. Para tais simulações não foram incluídas as configurações cinco e seis já que outras variações na altura (acima de 1,0 m) não causariam efeitos visíveis no gráfico.

É importante ressaltar que os valores apresentados na Tabela 5 correspondem aos valores lidos ao final do período de simulação, o que não significa que a magnitude do TE não assuma valores acima destes durante o período de simulação (o dia em questão). Com o propósito de apresentar tal fato algumas simulações com período de propagação inferior a 24 horas foram realizadas. Os resultados são apresentados na Tabela 6 abaixo e plotados na Figura 18.

Os dados para a simulação são do primeiro e a configuração utilizada é a de número 1.

Tabela 6 – Evolução do TE durante o período de simulação Dia 1 – Configuração 1

T [segundos]	T [horas]	TE Configuração 1 [10 ⁻²⁷ N.m]
1	0,000278	18,9628423496001
10	0,002778	21,1767109463982
100	0,027778	15,8310467916944
500	0,138889	50,1644546577592
1000	0,277778	85,5564267251680
5000	1,388889	7,0227340059989
10000	2,777778	2,4126874322316
20000	5,555556	41,6889038988232
30000	8,333333	3,4216678919788
40000	11,11111	99,0392271687816
50000	13,88889	77,5554514594497
60000	16,66667	47,1495572715869
70000	19,44444	77,0823590071946
86400	24	15,4114519973890
	MÉDIA	40,1768229717182

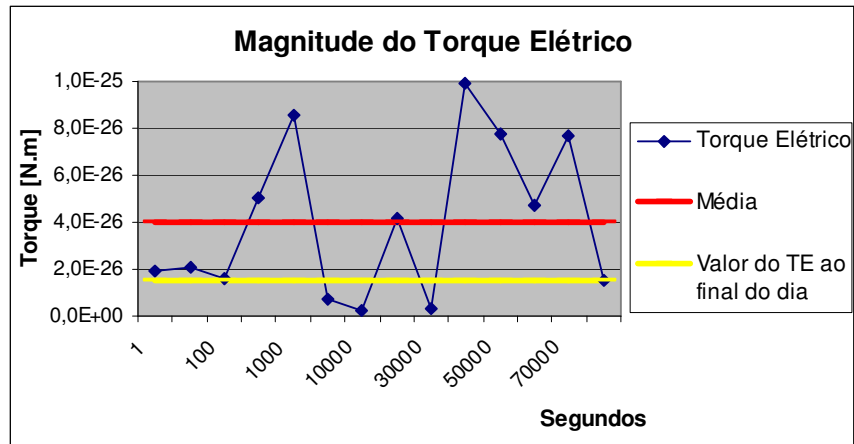


Figura 18 – Evolução Magnitude do Torque Elétrico durante um dia Dia 1 – Configuração 1

Através destes resultados observa-se que o TE pode assumir valores algumas quase dez vezes maiores que aqueles apresentados ao final do período de simulação.

Para a verificar a correlação entre a magnitude do TE e parâmetros como a carga elétrica do satélite e a altura da manta cilíndrica carregada que recobre o satélite, foram levantadas algumas curvas geradas a partir dos valores médios do TE para cada simulação. Primeiro determina-se a médias das médias da magnitude do torque elétrico de todas as configurações de distribuição de carga elétrica e então, analisa-se o desvio entre esta e a média das configurações de 1 a 4, nas quais a altura h varia de $h = 0,01$ m até $h = 1,0$ m.

Os resultados são apresentados através da Tabela 7 e da Figura 19 abaixo. Todas as simulações são realizadas com os dados do primeiro dia.

Tabela 7 – Variação da Magnitude do TE em função da Altura

Altura [m]	Média do TE – Dia 1 [10^{-27} N.m]	Média das Médias [10^{-27} N.m]	Desvios [10^{-37} N.m]
0,01	15,14698225626460	15,14698225692120	-6,5659
0,1	15,14698225626490	-	-6,5634
0,5	15,14698225641900	-	-5,0219
1	15,14698225873640	-	18,1513

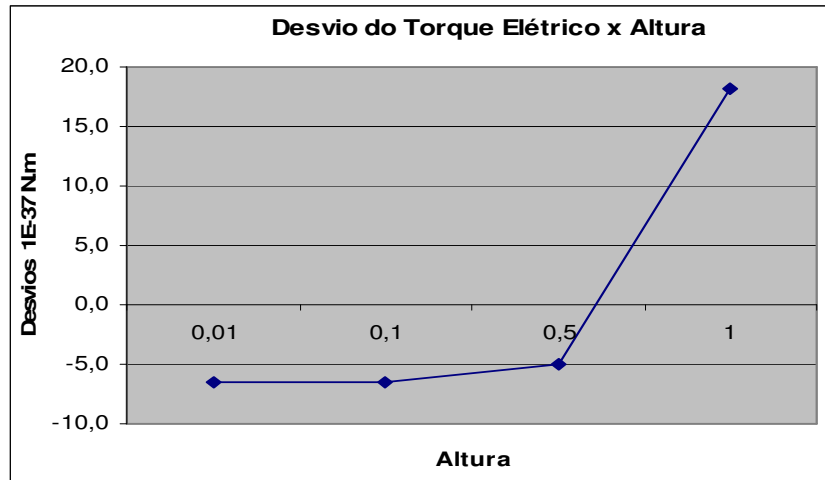


Figura 19 – Desvio do TE em Função da Altura

A partir do gráfico acima nota-se que não há linearidade entre a altura e a magnitude do TE. Conforme é apresentado no gráfico tal correlação aproxima-se muito mais de uma exponencial.

Agora analisa-se a média das magnitude do TE para as configurações 4, 7, 8, 9 e 10. Em todas estas configurações tem-se $h = 1,00\text{m}$ e a carga Q varia de $Q = 1,00\text{ C}$ até $Q = 1,00\text{ pC}$.

Os resultados são apresentados através da Tabela 7 e da Figura 19 abaixo.

Todas as simulações são realizadas com os dados do primeiro dia.

Tabela 8 – Variação da Magnitude do TE em função da Carga Elétrica

Carga [C]	Médias do TE [N.m]
1,00	$1,514698225873640 \cdot 10^{-26}$
$1,00 \cdot 10^{-03}$	$1,514698297817790 \cdot 10^{-29}$
$1,00 \cdot 10^{-06}$	$1,514698222049240 \cdot 10^{-32}$
$1,00 \cdot 10^{-09}$	$1,514698200468160 \cdot 10^{-35}$
$1,00 \cdot 10^{-12}$	$1,514698218476410 \cdot 10^{-38}$

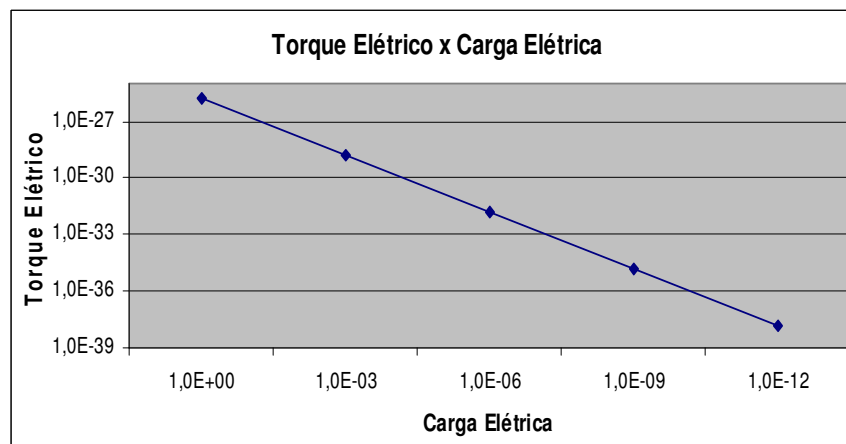


Figura 20 – Magnitude do TE em função da Carga Elétrica

Através do gráfico acima observa-se uma linearidade praticamente perfeita entre a carga elétrica e a magnitude do TE, confirmando assim que a carga elétrica é realmente o parâmetro dominante para o TE.

3.2 Resultados para o Satélite SCD1 - Simulações sem Atualização Diária dos Dados

São apresentadas agora as simulações para o satélite SCD1, sem a atualização diária dos dados, sob a ação do TE.

Estas simulações são realizadas com intuito de averiguar por quantos dias o modelo desenvolvido para o TE consegue, sozinho, ser fidedigno aos valores reais, considerando-se a margem de erro aceita pelo CRC/INPS.

Iniciando-se a partir do segundo dia, escolhido aleatoriamente, para a configuração 4, realizam-se as simulações sem atualização diária dos dados. Esta configuração foi escolhida por apresentar um valor de TE relativamente alto sem que a altura h ultrapasse a altura do satélite.

Os resultados obtidos para a ascensão reta, declinação e velocidade de rotação são apresentados na Tabela 9 abaixo em conjunto com as Figuras 21 a 23, bem como a magnitude do torque ao final de cada período de simulação e os desvio em relação aos valores reais.

Tabela 9 – Resultados para o SCD1 Sem Atualização Diária dos Dados - Configuração 4 – Dia 2

Dias	Valores Simulados			TE Configuração 4 Dia 2 [10^{-26} N.m]	Média dos Desvios		
	Ascensão Reta [°]	Declinação [°]	Velocidade de Rotação [rpm]		Ascensão Reta [°]	Declinação [°]	Velocidade de Rotação [rpm]
2	281,01	80,82	86,88	-	0	0	0
3	281,0100197835350	80,8199996948238	86,8799972534180	2,4098248008746	0,24500501	0,13500061	0,03999863
4	281,0100197835250	80,8199996948229	86,8799972534180	3,7172604524933	0,52000668	0,26333415	0,07666484
5	281,0100197835200	80,8199996948278	86,8799972534180	5,4737114233954	1,01250751	0,32750092	0,13249794
6	281,0100197835270	80,8199996948280	86,8799972534180	7,5855231480570	1,30800801	0,45200098	0,16599780

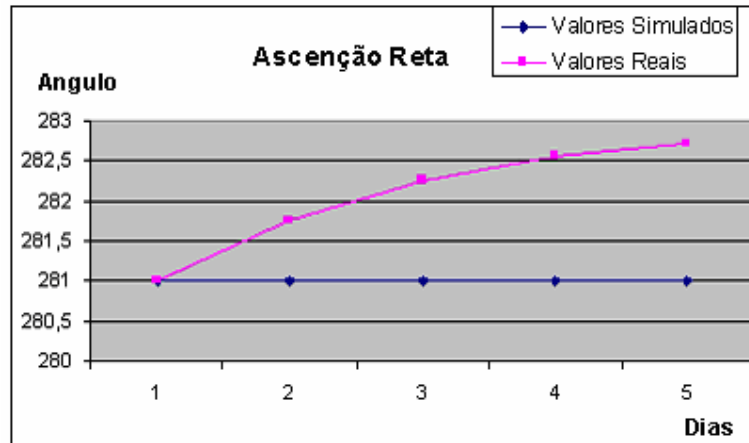


Figura 21 – Resultados da Ascensão Reta para o SCD1 Sem Atualização Diária dos Dados

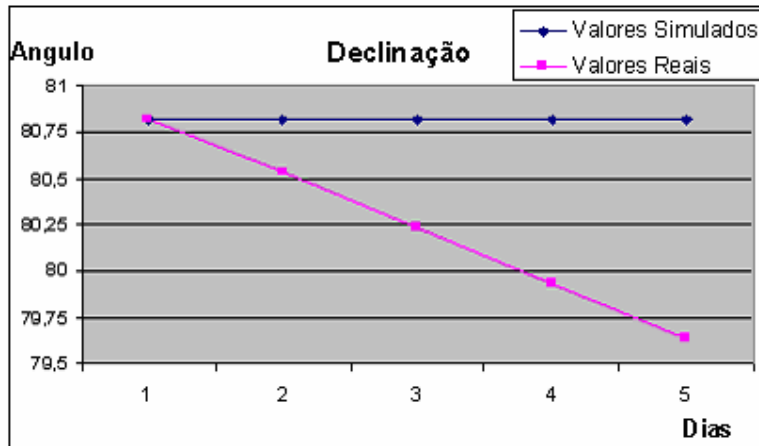


Figura 22 – Resultados da Declinação para o SCD1 sem Atualização Diária dos Dados

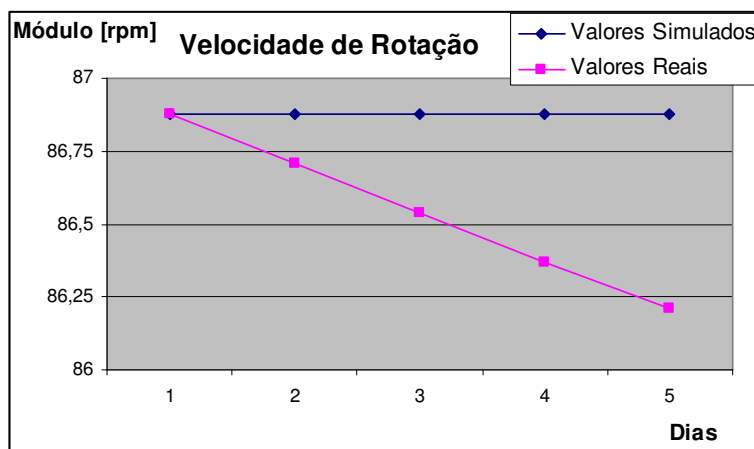


Figura 23 – Resultados da Velocidade de Rotação para o SCD1 sem Atualização Diária dos Dados

Ainda com o mesmo propósito das simulações anteriores repete-se o processo, porém iniciando as simulações desta vez do oitavo dia e com um valor de carga mais baixo.

Então, para a configuração 10, os resultados da ascensão reta, declinação e velocidade de rotação são apresentados na Tabela 10 abaixo em conjunto com as Figuras 24 a 26, bem como a magnitude do torque ao final de cada período de simulação e os desvios em relação aos valores reais.

Tabela 10 – Resultados para o SCD1 – Sem Atualização Diária dos Dados - Configuração 10 – Dia 8

Dias	Valores Simulados				Média dos Desvios		
	Ascensão Reta [°]	Declinação [°]	Velocidade de Rotação [rpm]	TE Configuração 4 Dia 2 [10^{-39} N.m]	Ascensão Reta [°]	Declinação [°]	Velocidade de Rotação [rpm]
8	283,5	79,22	85,88	-	0	0	0
9	283,5000100179150	79,2200012207011	85,8799972534179	2,34160289358919	0,00001002	0,00000122	-0,00000275
10	283,5000100178950	79,2200012207022	85,8799972534179	41,4650164301342	0,24501002	0,13500122	0,03999725
11	283,5000100179080	79,2200012207032	85,8799972534179	22,6046014789096	0,52001002	0,26333455	0,07666392
12	283,5000100179080	79,2200012207051	85,8799972534179	50,5140060559768	1,01251002	0,32750122	0,13249725

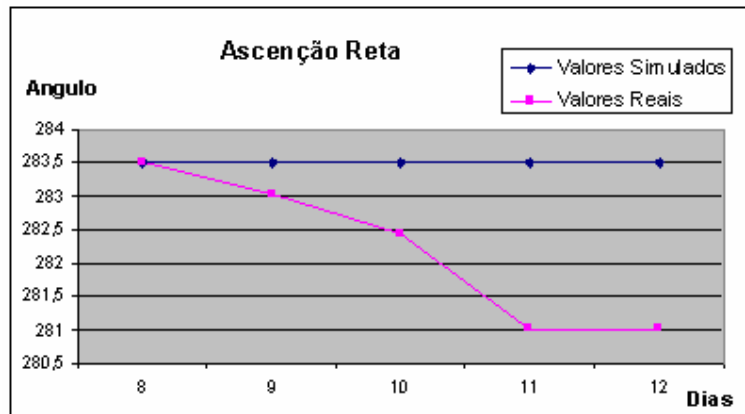


Figura 24 – Resultados da Ascensão Reta para o SCD1 sem Atualização Diária dos Dados

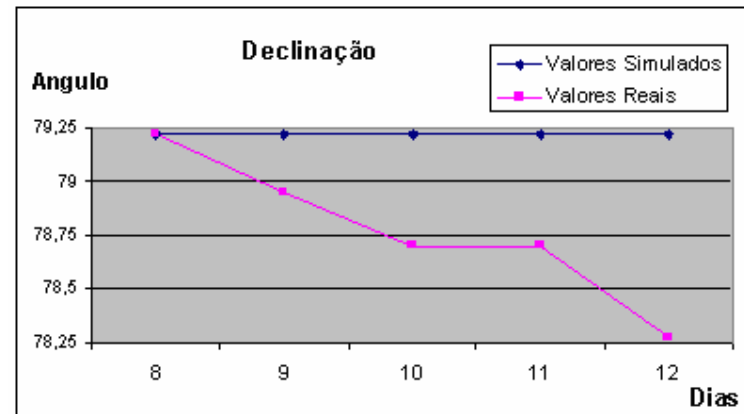


Figura 25 – Resultados da Declinação para o SCD1 sem Atualização Diária dos Dados

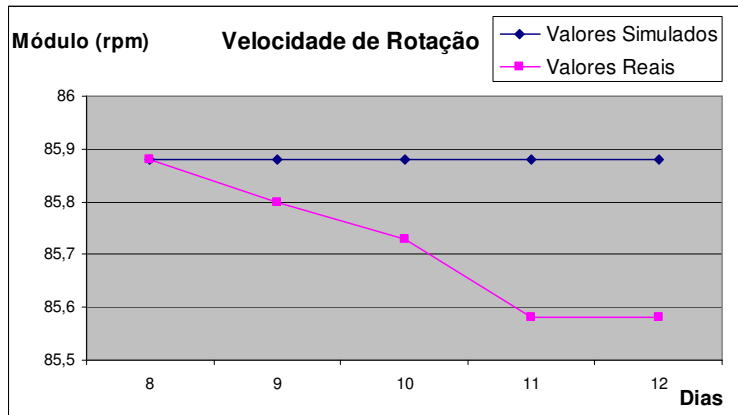


Figura 26 – Resultados da Velocidade de Rotação para o SCD1 sem Atualização Diária dos Dados

Observa-se que o devido à baixa intensidade do torque, este afeta muito pouco o valor das variáveis observadas, fazendo com que o desvio entre os valores reais e simulados seja praticamente iguais a variação real de tal variável entre um dia e outro. Daí o grande aumento nos desvio em tão poucos dias, principalmente no segundo caso, iniciado no oitavo dia, em que há uma variação maior na ascensão reta ao decorrer dos dias.

3.3 Resultados para o Satélite SCD2 - Simulações com Atualização Diária dos Dados

Agora, para o satélite SCD2 são realizadas simulações com atualização diária dos dados com o intuito de observar o desvio na ascensão reta, declinação e velocidade de rotação deste satélite.

Previendo-se que, para as diferentes configurações de distribuição de carga elétrica, não haveria grande discrepâncias – idéia esta baseada nos resultados obtidos para o SCD1 – escolhe-se então um número menor de simulações. Estas são descritas na Tabela 11 abaixo.

Tabela 11 – Configurações de Distribuição de Carga

Configuração	Carga Q [C]	Altura h [m]
1	1,00	0,01
2	1,00	0,50
3	1,00	1,00
4	1,00E-6	0,01
5	1,00E-6	0,50
6	1,00E-6	1,00
7	1,00E-12	0,01
8	1,00E-12	0,50
9	1,00E-12	1,00

Para cada uma dessas combinações de parâmetros, mantendo-se o diâmetro da casca cilíndrica em $d = 1,00$ m, realizam-se as simulações para um período de 16 dias.

A partir do modelo obtido para o TE, a configuração 7 deve ser aquela a apresentar menores intensidades de torque enquanto que a configuração 3 apresentará as maiores magnitudes. São então apresentados, antes dos demais resultados, os resultados para estes dois casos em particular.

3.3.1 Resultados para Ascensão Reta, Declinação e Velocidade de Rotação

Para a configuração 7 os resultados estão apresentados na Tabela 12, em conjunto com as Figuras 27 a 29. As Figuras e Tabelas apresentam os comportamentos temporais dos ângulos de ascensão reta e declinação do eixo de rotação do satélite e da magnitude da velocidade de rotação. Na Figura 30 apresenta-se a curva de evolução do desvio angular entre os valores reais e valores calculados das três variáveis citadas.

Tabela 12 – Resultados para SCD2 com Atualização Diária dos Dados – Configuração 7

Valores Reais				Valores Simulados				
Dias	Ascensão Reta [°]	Declinação [°]	Velocidade de Rotação [rpm]	Dias	Ascensão Reta [°]	Declinação [°]	Velocidade de Rotação [rpm]	Torque Elétrico [10 ⁻³⁹ N.m]
12/2/2002	278,71	63,47	34,48	12/2/2002	278,71	63,47	34,48	-
13/2/2002	278,73	63,45	34,42	13/2/2002	278,710010017919	63,470000000001	34,480000000000	37,670425631992
14/2/2002	278,74	63,42	34,37	14/2/2002	278,730010017900	63,450000000001	34,420000000000	24,101167540667
15/2/2002	278,74	63,39	34,31	15/2/2002	278,740010017914	63,419999999995	34,370000000000	20,031889987216
16/2/2002	278,72	63,36	34,26	16/2/2002	278,740010017907	63,389999999992	34,310000000000	0,334022961083
17/2/2002	278,68	63,33	34,2	17/2/2002	278,720010017893	63,359999999998	34,260000000000	1,053814655110
18/2/2002	278,63	63,31	34,14	18/2/2002	278,680010017906	63,329999999998	34,200000000000	12,354529889092
19/2/2002	278,57	63,29	34,08	19/2/2002	278,630010017913	63,310000000003	34,140000000000	14,070205863824
20/2/2002	278,5	63,27	34,02	20/2/2002	278,570010017914	63,289999999999	34,080000000000	9,013117622134
21/2/2002	278,42	63,25	33,96	21/2/2002	278,500010017960	63,270000000000	34,020000000000	3,326974759506
22/2/2002	278,23	63,24	33,9	22/2/2002	278,420010017918	63,249999999992	33,960000000000	1,617992013286
23/2/2002	276,23	63,23	33,83	23/2/2002	278,330100179019	63,240000000000	33,900000000000	3,871203966728
24/2/2002	276,6	61,22	33,69	24/2/2002	276,230010017903	63,230000000008	33,830000000000	2,188615382789
25/2/2002	276,42	61,03	33,69	25/2/2002	276,600010017910	61,220000000002	33,690000000000	9,141154708246
26/2/2002	276,2	60,83	33,55	26/2/2002	276,420010017909	61,030000000002	33,690000000000	11,675508318126
27/2/2002	275,94	60,62	33,48	27/2/2002	276,200010017898	60,829999999997	33,550000000000	18,662045273359
				28/2/2002	275,940010017907	60,620000000007	33,480000000000	3,558945660158

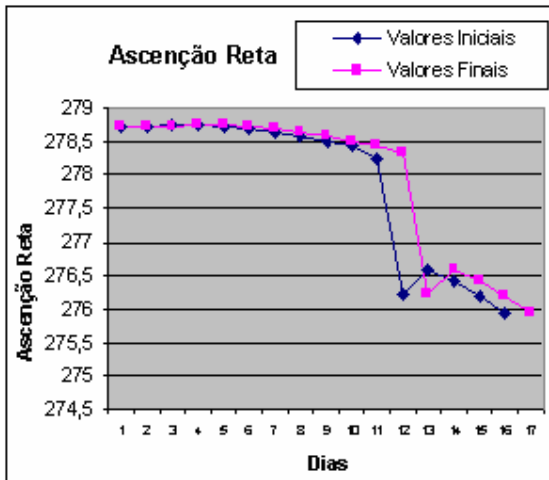


Figura 27 – Comportamento temporal da Ascensão Reta para SCD2 – Configuração 7

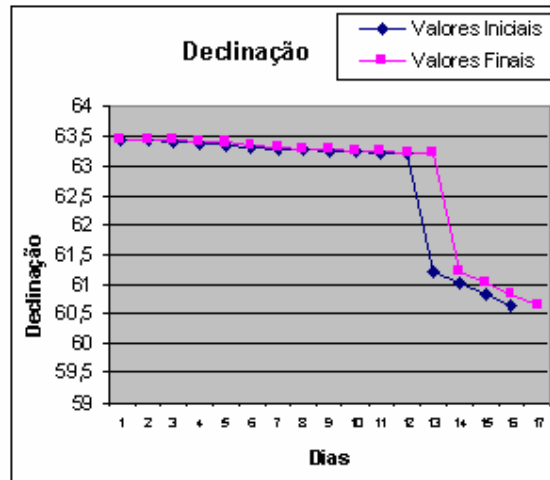


Figura 28 – Comportamento temporal da Declinação para SCD2 – Configuração 7

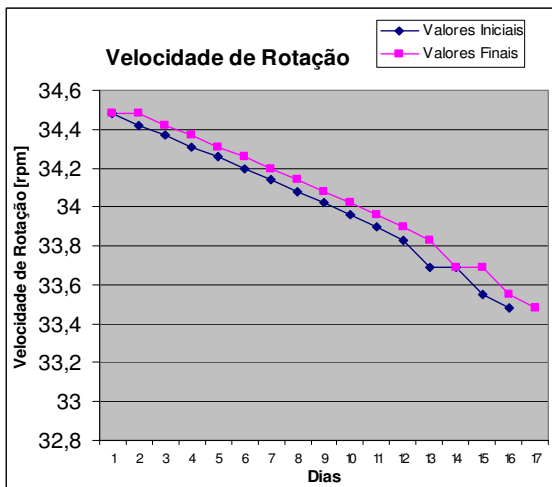


Figura 29 – Comportamento temporal da Velocidade de Rotação para SCD2 – Configuração 7

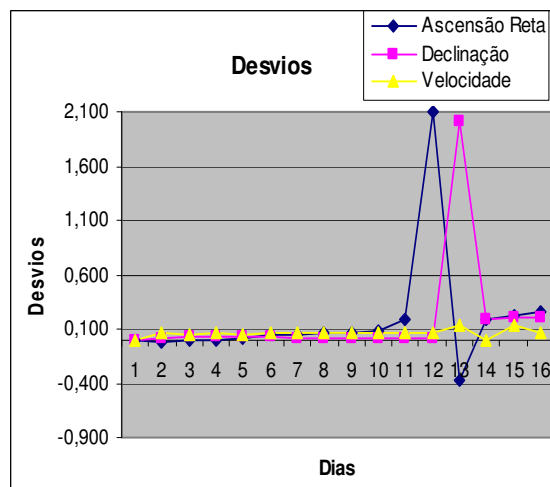


Figura 30 – Comportamento temporal dos Desvios para SCD2 – Configuração 7

A média e desvio padrão dos desvios para ascensão reta, declinação e velocidade de rotação foram, respectivamente, $\Delta\alpha = 0,179390027 \pm 0,53146613$, $\Delta\delta = 0,178125000 \pm 0,49385853$ e $\Delta W = 0,062500000 \pm 0,03678768$.

Para a configuração 3 os resultados estão apresentados na Tabela 13, em conjunto com as Figuras 31 a 33. As Figuras e Tabelas apresentam os comportamentos temporais dos ângulos de ascensão reta e declinação do eixo de rotação do satélite e da magnitude da velocidade de rotação. Na Figura 34 apresenta-se a curva de evolução do desvio angular entre os valores reais e valores obtidos a partir das simulações para as três variáveis citadas.

Tabela 13 – Resultados para SCD2 com Atualização Diária dos Dados – Configuração 3

Valores Reais				Valores Simulados				
Dias	Ascensão Reta [°]	Declinação [°]	Velocidade de Rotação [rpm]	Dias	Ascensão Reta [°]	Declinação [°]	Velocidade de Rotação [rpm]	Torque Elétrico [10 ⁻³⁹ N.m]
12/2/2002	278,71	63,47	34,48	12/2/2002	278,71	63,47	34,48	-
13/2/2002	278,73	63,45	34,42	13/2/2002	278,710010017905	63,469999999990	34,480000000000	37,670425782573
14/2/2002	278,74	63,42	34,37	14/2/2002	278,730010017908	63,450000000003	34,420000000000	24,101167640422
15/2/2002	278,74	63,39	34,31	15/2/2002	278,740010017909	63,419999999999	34,370000000000	20,031890071417
16/2/2002	278,72	63,36	34,26	16/2/2002	278,740010017903	63,389999999999	34,310000000000	0,334023317719
17/2/2002	278,68	63,33	34,2	17/2/2002	278,720010017893	63,360000000004	34,260000000000	1,053814746328
18/2/2002	278,63	63,31	34,14	18/2/2002	278,680010017909	63,329999999990	34,200000000000	12,354529941400
19/2/2002	278,57	63,29	34,08	19/2/2002	278,630010017920	63,310000000012	34,140000000000	14,070205920143
20/2/2002	278,5	63,27	34,02	20/2/2002	278,570010017929	63,289999999999	34,080000000000	9,013117658540
21/2/2002	278,42	63,25	33,96	21/2/2002	278,500010017923	63,270000000010	34,020000000000	3,326974774155
22/2/2002	278,23	63,24	33,9	22/2/2002	278,420010017903	63,249999999991	33,960000000000	1,617992020241
23/2/2002	276,23	63,23	33,83	23/2/2002	278,330010017922	63,240000000005	33,900000000000	3,871203982262
24/2/2002	276,6	61,22	33,69	24/2/2002	276,230010017923	63,229999999995	33,830000000000	2,188615396508
25/2/2002	276,42	61,03	33,69	25/2/2002	276,600010017922	61,220000000003	33,690000000000	9,141154746192
26/2/2002	276,2	60,83	33,55	26/2/2002	276,420010017918	61,030000000001	33,690000000000	11,675508366583
27/2/2002	275,94	60,62	33,48	27/2/2002	276,200010017924	60,830000000003	33,550000000000	18,662045347974
				28/2/2002	275,940010017912	60,620000000010	33,480000000000	3,558945697347

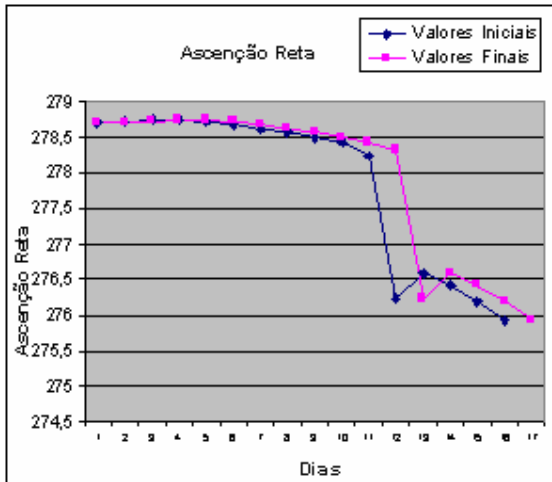


Figura 31 – Comportamento temporal da Ascensão Reta para SCD2 – Configuração 3

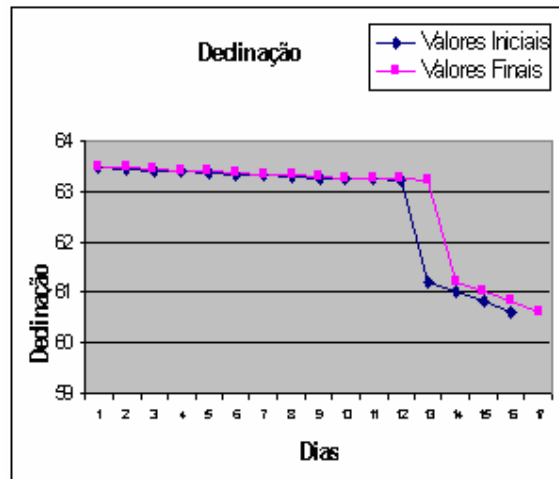


Figura 32 – Comportamento temporal da Declinação para SCD2 – Configuração 3

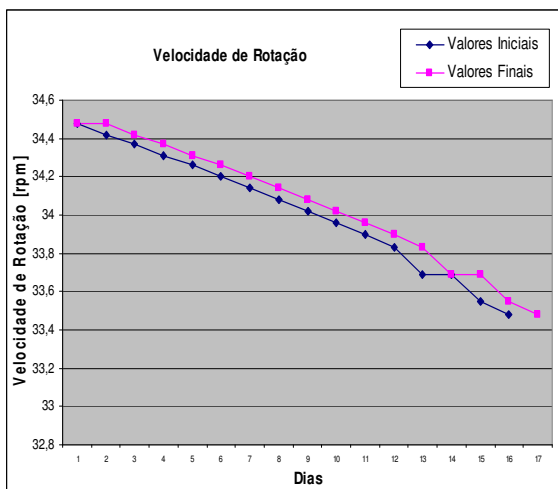


Figura 33 – Comportamento temporal da Velocidade de Rotação para SCD2 – Configuração 3

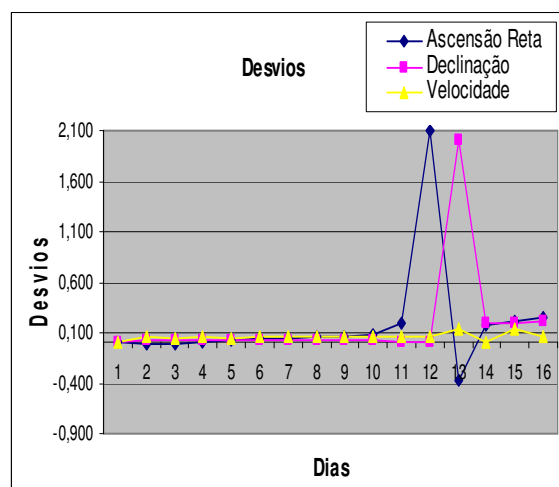


Figura 34 – Comportamento temporal dos Desvios para SCD2 – Configuração 3

A média e desvio padrão dos desvios para ascensão reta, declinação e velocidade de rotação foram, respectivamente, $\Delta\alpha = 0,17938439 \pm 0,53144441$, $\Delta\delta = 0,17812500 \pm 0,49385853$ e $\Delta W = 0,06250000 \pm 0,03678768$.

Observa-se que os desvios foram praticamente os mesmos apresentados para a configuração onde o TE apresentou sua menor magnitude, assim como havia acontecido para o SCD1.

Para a configuração 7 a intensidade média do TE foi $\overline{TE} = (1,079197589 \pm 1,02796842) \cdot 10^{-38}$ N.m, enquanto que para a configuração 3 foi $\overline{TE} = (1,079197596 \pm 1,02796842) \cdot 10^{-26}$ N.m.

O comportamento apresentado na ordem dos desvios e na magnitude do TE para este caso é o mesmo apresentado anteriormente para o SCD1.

Os resultados com os comportamentos temporais dos ângulos de ascensão reta, declinação, do módulo da velocidade de rotação do satélite e dos desvios entre os valores calculados e os valores reais, para as diferentes configurações descritas mostram-se bastante análogos. Estes são apresentados em conjunto nas Figuras 35 a 40.

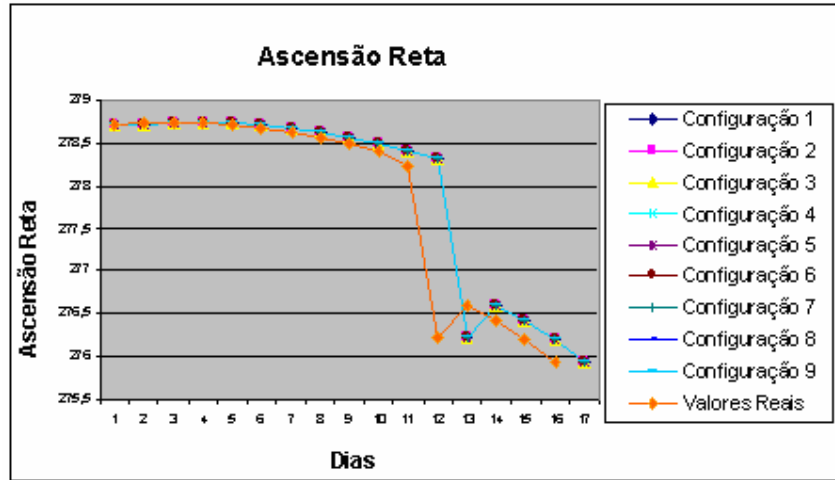


Figura 35 – Comportamento temporal da Ascensão Reta para SCD2

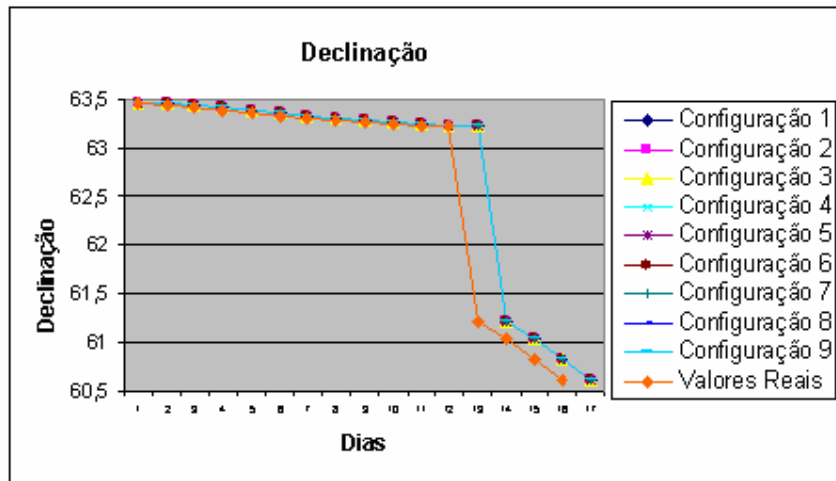


Figura 36 – Comportamento temporal da Declinação para SCD2

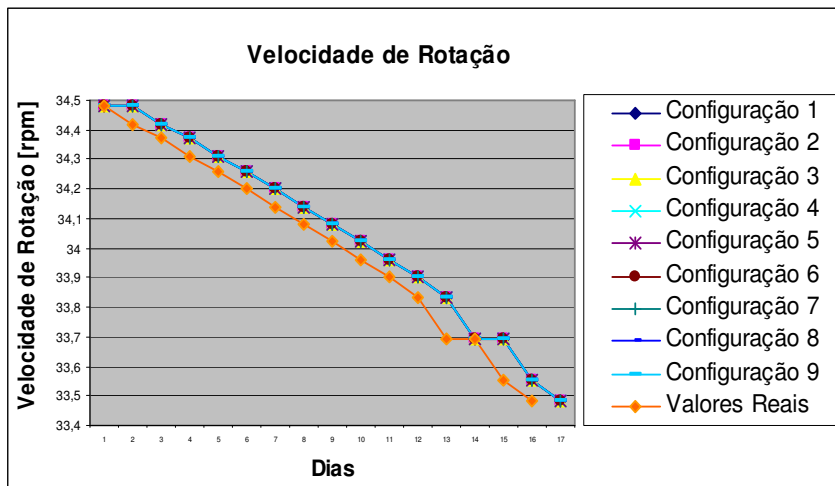


Figura 37 – Comportamento temporal da Velocidade de Rotação para SCD2

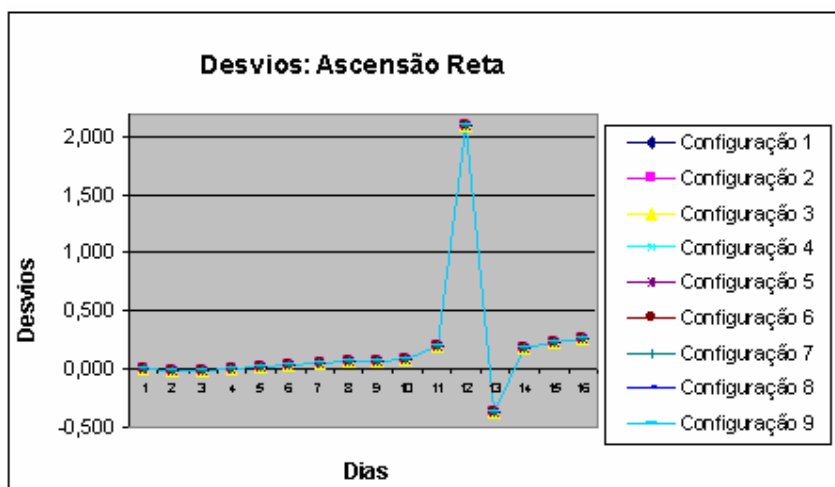


Figura 38 – Comportamento temporal do Desvio da Ascensão Reta para SCD2

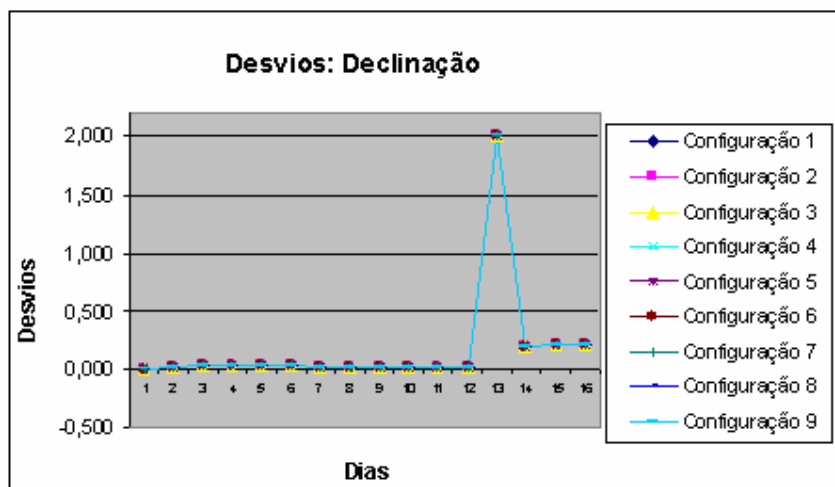


Figura 39 – Comportamento temporal Desvio da Declinação para SCD2

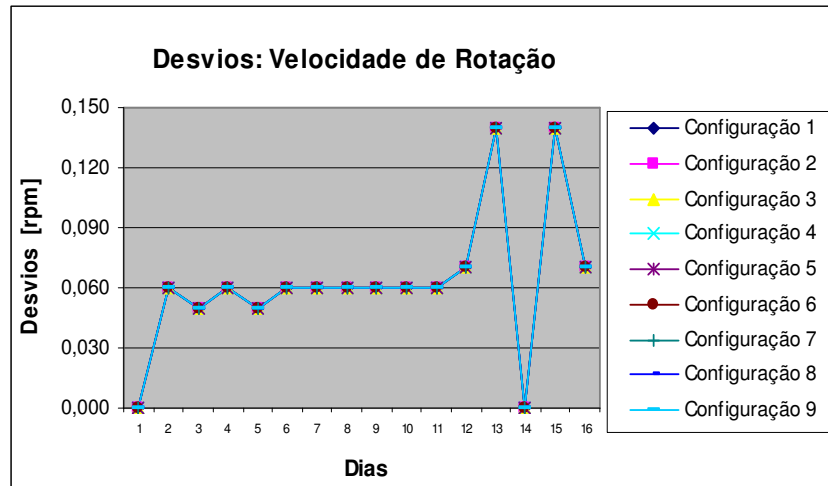


Figura 40 – Comportamento temporal do Desvio da Velocidade de Rotação para SCD2

Os gráficos demonstram aquilo que já havia sido observado para o SCD1. Devido à baixa intensidade do torque, apesar das variações causadas em sua magnitude pelas diferentes configurações de distribuição carga, este não produz alterações significativas nos desvios nas variáveis monitoras e novamente tem-se que os desvios representam praticamente a diferença nos valores das variáveis entre um dia e o dia seguinte.

3.3.2 Resultados para Magnitude do Torque Elétrico

Também para o SCD2, foram realizadas simulações com intuito de se obter o comportamento temporal da magnitude do TE. A Tabela 14 abaixo apresenta os valores da magnitude do TE para as diversas configurações de distribuição de carga elétrica, e estas são representadas graficamente na Figura 41.

Tabela 14 – Magnitudes do Torque Elétrico – Configurações 1 a 9 – SCD2

Dia	TE Configuração 1 [10⁻²⁷ N.m]	TE Configuração 2 [10⁻²⁷ N.m]	TE Configuração 3 [10⁻²⁷ N.m]	TE Configuração 4 [10⁻³³ N.m]	TE Configuração 5 [10⁻³³ N.m]	TE Configuração 6 [10⁻³³ N.m]	TE Configuração 7 [10⁻³⁹ N.m]	TE Configuração 8 [10⁻³⁹ N.m]	TE Configuração 9 [10⁻³⁹ N.m]
12/2/2002	37,670135093524	37,670425782527	37,670425782573	37,670425782524	37,670425782527	37,670425687455	37,670425631992	37,670425631995	37,670425632040
13/2/2002	24,101167636968	24,101167637184	24,101167640422	24,101167636968	24,101167636968	24,101167579569	24,101167540667	24,101167540877	24,101167544115
14/2/2002	20,031890067271	20,031890067530	20,031890071417	20,031890067271	20,031890067530	20,031890020830	20,031889987216	20,031889987475	20,031889991362
15/2/2002	0,334022962413	0,334022984619	0,334023317719	0,334022962413	0,334022984619	0,334023316880	0,334022961083	0,334022983289	0,334023316389
16/2/2002	1,053814659328	1,053814664766	1,053814746328	1,053814659328	1,053814664766	1,053814743660	1,053814655110	1,053814660548	1,053814742110
17/2/2002	12,354529938449	12,354529938633	12,354529941400	12,354529938449	12,354529938633	12,354529910218	12,354529889092	12,354529889277	12,354529892044
18/2/2002	14,070522601771	14,070522601777	14,070205920143	14,070205920044	14,070205920051	14,070205884621	14,070205863824	14,070205863830	14,070205863923
19/2/2002	9,013117658140	9,013117658165	9,013117658540	9,013117658140	9,013117658170	9,013117635794	9,013117622134	9,013117622159	9,013117622535
20/2/2002	3,326974772787	3,326974772873	3,326974774155	3,326974772787	3,326974772873	3,326974765767	3,326974759506	3,326974759591	3,326974760873
21/2/2002	1,617992019751	1,617992019782	1,617992020241	1,617992019751	1,617992019782	1,617992016155	1,617992013286	1,617992013316	1,617992013775
22/2/2002	3,871203982204	3,871203982207	3,871203982262	3,871203982204	3,871203982207	3,871203972481	3,871203966728	3,871203966731	3,871203966786
23/2/2002	2,188615391533	2,188615391844	2,188615396508	2,188615391533	2,188615391844	2,188615390984	2,188615382789	2,188615383100	2,188615387764
24/2/2002	9,141154744776	9,141154744864	9,141154746192	9,141154744776	9,141154744864	9,141154723109	9,141154708246	9,141154708334	9,141154709662
25/2/2002	11,675508364783	11,675508364896	11,675508366583	11,675508364783	11,675508364896	11,675508337100	11,675508318126	11,675508318238	11,675508319925
26/2/2002	18,662045347932	18,662045347935	18,662045347974	18,662045347932	18,662045347935	18,662045300854	18,662045273359	18,662045273362	18,662045273401
27/2/2002	3,558945674384	3,558945675819	3,558945697347	3,558945674384	3,558945675819	3,558945688357	3,558945660158	3,558945661593	3,558945683121
MÉDIA	10,791977557251	10,791995727214	10,791975963113	10,791975932705	10,791975934593	10,791975935865	10,791975889582	10,791975891482	10,791975919989

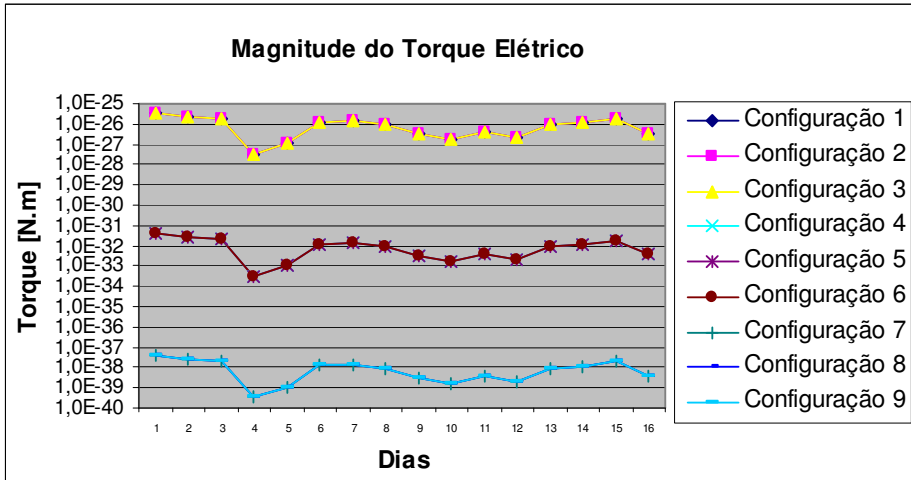


Figura 41 – Comportamento Temporal da Magnitude do Torque Elétrico

Assim como havia sido observado para o satélite SCD1, as variações no TE seguem uma curva padrão, independente de sua ordem de grandeza, com o passar dos dias.

Os valores apresentados na Tabela 14 correspondem aos valores lidos ao final do período de simulação.

Para o satélite SCD2 foi também analisada a correlação entre a magnitude do TE e a altura h da manta cilíndrica que recobre o satélite. Para evidenciar tal relação assume-se uma carga bastante elevada, adota-se $Q = 1,0 \cdot 10^{20}$ C. Os dados utilizados na simulação foram os do sétimo dia, escolhido aleatoriamente.

A Tabela 15 em conjunto com a Figura 42 apresenta a relação entre h e a magnitude do TE.

Tabela 15 – Variação da Magnitude do TE em função da Altura

Altura h [m]	TE (h) [10^{-06} N .m]
0,1	1,40234114493830
0,5	1,40234115747177
1	1,40234119509521
2	1,40234134571592
5	1,40234240575674
10	1,40234627335533
50	1,40253380728354
100	1,40390442971250

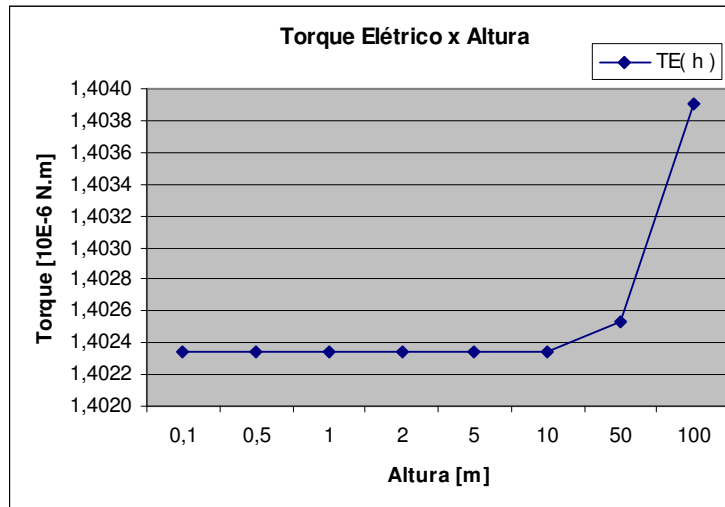


Figura 42 – Variação da Magnitude do TE em Função da Altura – $Q = 1.10^{20}$ C

Assim como para o SCD1, o TE varia exponencialmente com a altura h , porém, esta exerce influência muito inferior a da carga elétrica, conforme apresentado anteriormente.

A Figura 43 traz ainda os desvios para ascensão reta, declinação e velocidade de rotação do satélite SCD2 em função da altura h .

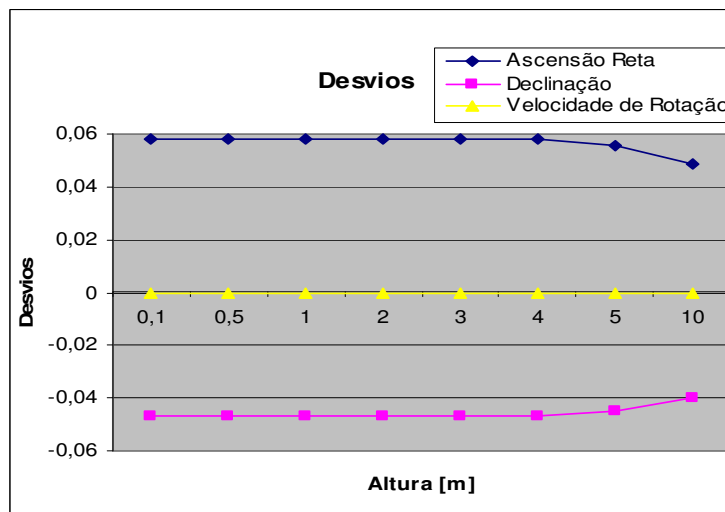


Figura 43 – Desvios em Função da Altura – $Q = 1.10^{20}$ C

Uma análise similar é realizada estudando-se a relação entre a altitude do satélite e a intensidade do TE. Segundo o modelo proposto a magnitude do TE deve aumentar com a diminuição da altitude do satélite já que quanto mais próximo da Terra maior será o campo geomagnético interagindo com a carga elétrica do satélite.

A altitude é variada percentualmente em relação a altitude real do satélite.

Os dados escolhidos aleatoriamente para tais simulações foram os do sétimo dia e a Q é fixada em $Q = 1,0.10^{20}$ C para evidenciar os resultados.

Os resultados obtidos são apresentados através da Tabela 16 que é representado graficamente pela Figura 44 abaixo.

Tabela 16 – Variação da Magnitude do TE em função da Altitude

% Altitude Real do Satélite	TE (Altitude) [N .m]
10	1,08628621696750E+00
50	7,91130087319968E-05
100	1,40234119509501E-06
200	2,19604993775314E-08
300	1,92800741254092E-09
400	3,43144775147444E-10
500	8,99533806955663E-11
1000	1,40552177423915E-12

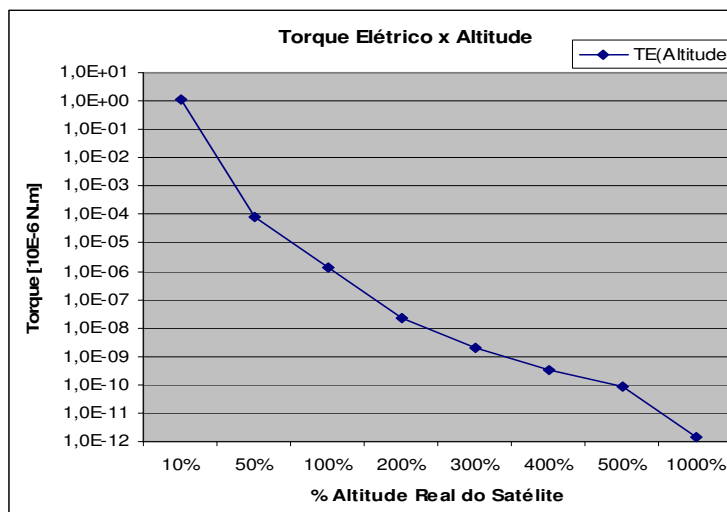


Figura 44 – Variação da Magnitude do TE em Função da Altitude – $Q = 1.10^{20}$ C

Observa-se que a diminuição da altitude do satélite provoca um grande aumento na ordem de grandeza do TE, sendo que quando esta cai a 10% de seu valor original o TE sofre um aumento da ordem de 10^6 .

A Figura 43 traz ainda os desvios para ascensão reta, declinação e velocidade de rotação do satélite SCD2 em função da altitude do satélite.

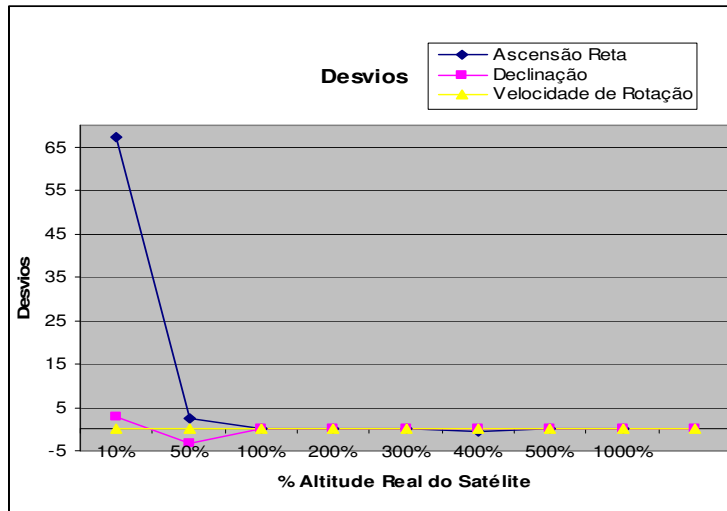


Figura 45 – Desvios em Função da Altitude – $Q = 1.10^{20}$ C

Agora, analisando-se a ação da variação do diâmetro da manta cilíndrica que recobre o satélite na magnitude do TE, assume-se uma carga bastante elevada, adota-se $Q = 1,0.10^{20}$ C, para evidenciar tais resultados.

Os dados utilizados na simulação foram os do sétimo dia, escolhido aleatoriamente.

A Tabela 15 em conjunto com a Figura 42 apresenta a relação entre h e a magnitude do TE.

Tabela 17 – Variação da Magnitude do TE em função do Diâmetro

Altura d [m]	TE (d) [N .m]
0,1	1,40698907842170E-08
0,5	3,52667506656711E-07
1	1,40234119509521E-06
2	5,57792730979947E-06
5	3,33236049615462E-05
10	1,17833754085206E-04
50	7,50230743327893E-03
100	1,50217263356273E-02

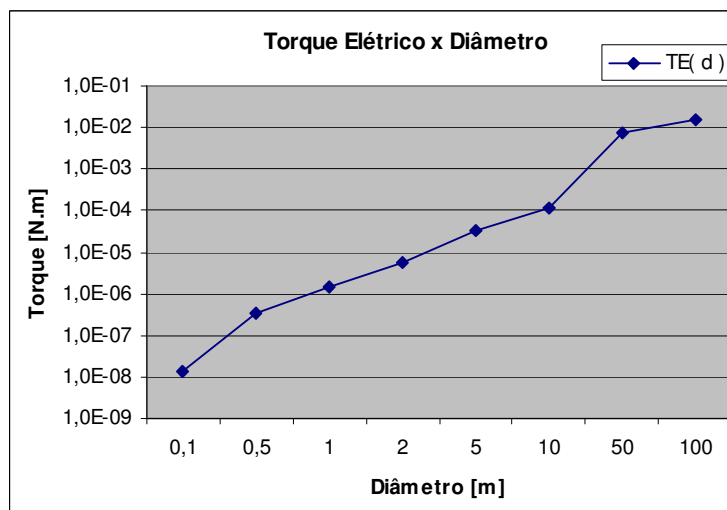


Figura 46 – Variação da Magnitude do TE em Função do Diâmetro – $Q = 1.10^{20}$ C

Observa-se que este parâmetro também apresenta forte influência sobre a magnitude do TE, relacionando-se com este de forma exponencial.

A Figura 47 traz ainda os desvios para ascensão reta, declinação e velocidade de rotação do satélite SCD2 em função da altura h, onde sua variação é dada em %.

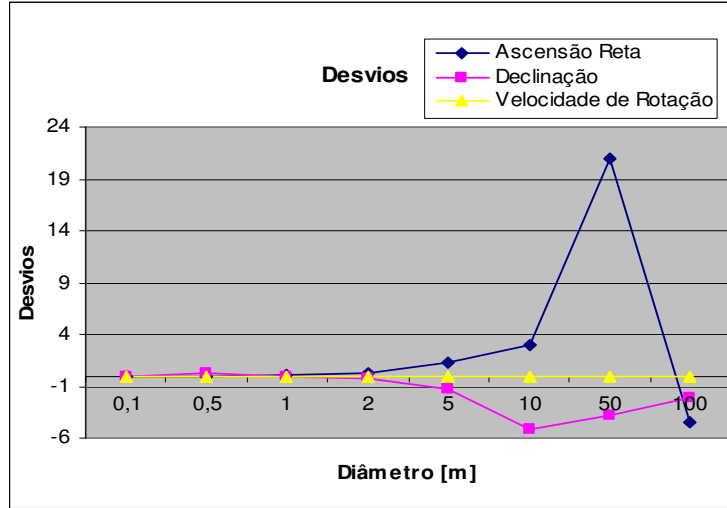


Figura 47 – Desvios em Função do Diâmetro – $Q = 1.10^{20} C$

3.4 Resultados para o Satélite SCD2 sem atualização diária dos dados

São apresentadas agora as simulações para o satélite SCD2, sem a atualização diária dos dados, sob a ação do TE.

Estas simulações são realizadas com intuito de averiguar por quantos dias o modelo desenvolvido para o TE consegue, sozinho, ser fidedigno aos valores reais, considerando-se determinada margem de erro.

Iniciando-se a partir do primeiro dia e utilizando-se a configuração 9 realizam-se as simulações sem atualização diária dos dados.

Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 17 abaixo em conjunto com as Figuras 48 a 50.

Tabela 18 – Resultados para o SCD2 Sem Atualização Diária dos Dados - Configuração 9 – Dia 1

Dias	Valores Simulados				Média dos Desvios		
	Ascensão Reta [°]	Declinação [°]	Velocidade de Rotação [rpm]	TE Configuração 9 Dia 2 [10^{-39} N.m]	Ascensão Reta [°]	Declinação [°]	Velocidade de Rotação [rpm]
1	278,71	63,47	34,48	-	0	0	0
2	278,710010017919	63,470000000001	34,480000000000	37,670425632040	-0,009994991	0,010000000	0,030000000
3	278,710010017926	63,4700000000020	34,480000000000	14,638537672858	-0,016659988	0,023333333	0,056666667
4	278,710010017935	63,4700000000017	34,480000000000	24,942397018893	-0,019992487	0,037500000	0,085000000
5	278,710010017953	63,4700000000020	34,480000000000	36,206002223574	-0,017991986	0,052000000	0,112000000
6	278,710010017963	63,4700000000025	34,480000000000	6,782581975370	-0,009991652	0,066666667	0,140000000
7	278,710001472991	63,470001220720	34,479999542236	30,354657516635	0,002864509	0,080000174	0,168571363
8	278,710001473001	63,470001220718	34,479999542236	35,389294262558	0,020006629	0,092500305	0,197499886
9	278,710001473002	63,470001220719	34,470001220719	4,626389298022	0,041117168	0,104444851	0,226666514
10	278,710001473008	63,470001220732	34,479999542236	29,895908888718	0,066005598	0,116000488	0,255999817
11	278,710001473019	63,470001220734	34,479999542236	37,544167249975	0,103641587	0,126364191	0,285454337
12	278,710001473016	63,470001220727	34,479999542236	16,365085919113	0,301671577	0,135833944	0,315833104
13	278,710001473010	63,470001220731	34,479999542236	11,497965908689	0,440773877	0,298462196	0,352307446
14	278,710001472994	63,470001220727	34,479999542236	26,453450277455	0,572861562	0,451429269	0,383571167
15	278,710001472997	63,470001220737	34,479999542236	25,199031984459	0,702004223	0,597334066	0,419999725
16	278,710001472988	63,470001220739	34,479999542236	15,182393356257	0,831254051	0,738125763	0,456249714

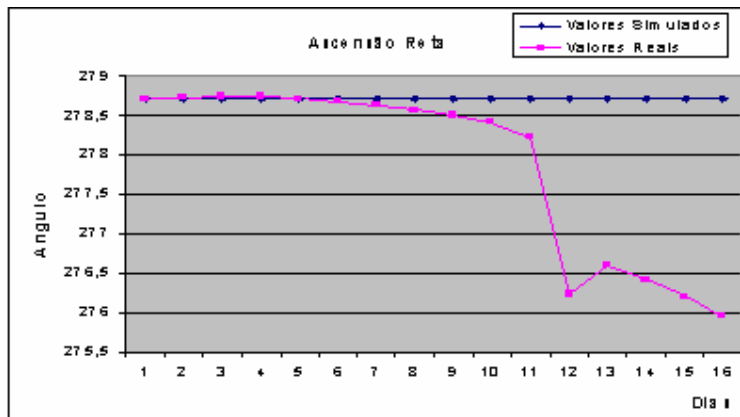


Figura 48 – Resultados da Ascensão Reta para o SCD2 sem Atualização Diária dos Dados

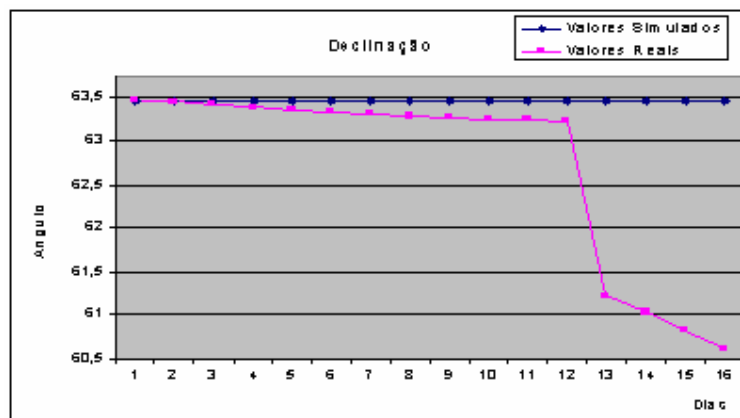


Figura 49 – Resultados da Declinação para o SCD2 sem Atualização Diária dos Dados

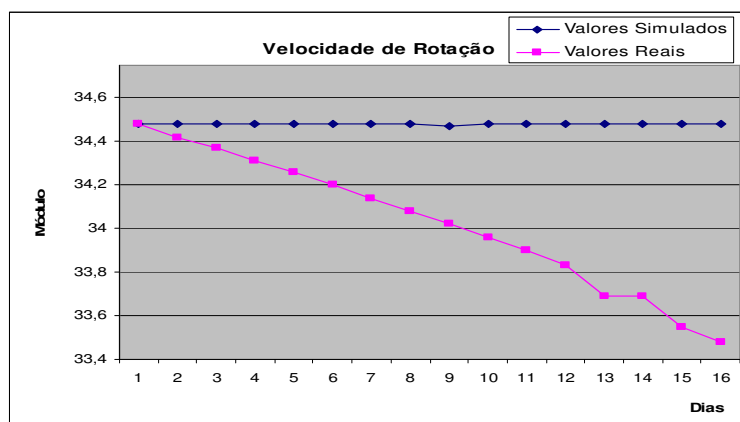


Figura 50 – Resultados da Declinação para o SCD2 sem Atualização Diária dos Dados

Confirmando o ocorrido para o SCD1, o desvio entre os valores reais e simulados é praticamente igual a variação real de tal variável entre um dia e outro, devido à baixa intensidade do TE. No caso do SCD2, como a variação nos valores reais entre os dias é menor, os desvios são menores.

4 CONCLUSÃO

Os resultados apontam que o torque devido à força de Lorentz causa, em pequenas proporções, um aumento na ascensão reta e um decaimento na declinação e na velocidade de rotação do satélite. A variável mais afetada é a ascensão reta, depois a declinação sendo que a atuação deste torque na velocidade de rotação é desprezível.

Com diferentes configurações de distribuição de carga verificaram-se grandes variações na magnitude do torque elétrico. Contudo, mesmo para aquelas configurações onde seus valores foram maiores, da ordem de 10^{-26} N.m, estes são ainda bastante inferiores aos de outros torques externos, que podem chegar à ordem de 10^{-6} [N.m]. Por este motivo, simulações envolvendo outros torques externos não foram apresentadas já que nestas os efeitos do torque elétrico é mascarado por torques de outra natureza.

A variação do torque elétrico com o passar dos dias do período de simulação apresenta uma curva característica, evidenciando uma relação entre o torque elétrico e a atitude do satélite, isto é, a ascensão reta e a declinação do eixo de rotação e velocidade de rotação. A priori não foi observada nenhuma relação mais direta com uma ou outra dentre estas variáveis.

O torque elétrico apresenta correlação positiva com a altura (h) e com o diâmetro (d) da manta cilíndrica carregada que recobre o satélite e com a carga elétrica (Q) do satélite e uma correlação negativa com a altitude do satélite. As correlações com a altura e com o diâmetro da manta apresentam características exponenciais, porém, variações no diâmetro mostram-se muito mais eficazes para o aumento do torque. Já a correlação com a carga elétrica é linear e se mostra bastante intensa, confirmando o que se esperava a partir da descrição do modelo obtido. Outro dado importante é a forte correlação entre a altitude do satélite e a magnitude do torque elétrico. Como a diminuição da altitude provoca um aumento do campo geomagnético, a interação entre este e a carga elétrica inerente ao satélite se intensifica produzindo aumentos significativos na magnitude do torque elétrico.

Devido à baixa intensidade do torque elétrico as simulações sem atualização dos dados agregam níveis altos de erro em pouco tempo, excedendo os limites estipulados da precisão pelo CRC/INPE em no máximo três dias de simulação. Na verdade, como o torque não provoca grandes variações nas variáveis monitoradas, os desvios entre os valores reais e os valores simulados são praticamente iguais à variação da própria variável durante o período de simulação.

A possibilidade de utilização deste torque para o controle de satélites artificiais, como já é realizado com o Torque Residual Magnético, encontraria diversos problemas técnicos devido aos altíssimos níveis de carga elétrica exigidos para que o valor do torque fosse significativo e, portanto, conclui-se que tal hipótese não seria viável para as características e dimensões dos satélites considerados neste projeto.

Durante o período desta pesquisa os resultados do projeto anterior foram apresentados na Jornada de Iniciação Científica e Pesquisa da FEG/UNESP de 2009 (agosto/2009) e no XXI Colóquio de Iniciação Científica da UNESP (novembro/2009).

Os resultados deste projeto serão apresentados no SICINPE2010 (julho/2010), serão submetidos para o Colóquio de Iniciação Científica da UNESP (outubro/2010) e foram submetidos para apresentação no Colóquio Brasileiro de Dinâmica Orbital (novembro/2010).

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdel-Aziz, Y. A. **Attitude Stabilization of a Rigid Spacecraft in the Geomagnetic Field.** **Advances in Space Research**, Elsevier Science Ltda, v. 40, p. 30-36, 2007.
- Beletskii, V.V., Khentov, A. A. **Rotational Motion of a magnetized satellite**, Moscou, 1985 (russo).
- Bento, P. R. S. P. **Propagação da Atitude de Satélites Artificiais com Quatérions e torque devido à Força de Lorentz**, Relatório Final de Bolsa de Iniciação Científica do CNPq/INPE, São José dos Campos, 2009.
- Pisacane, V. L.; Moore, R. C. **Fundamentals of Space Systems**. Oxford University Press, New York, 1994.
- Purvis, H.B.C.K.; Whittlesy, A.C.; Stevens, N. J., **Design Guidelines for Assessing and Controlling Spacecraft Charging Effects**. NASA Technical paper 2361, 1984.
- Sehna, L. The motion of a charged satellite in the Earth's magnetic field, **SAO Report**, No. 271, 1969.
- Shuster, M. D. **A Survey of Attitude Representations**. Journ. of Astron. Scienc., vol. 41, no. 4, pp 439-517, 1993.
- Wertz, J. R. **Spacecraft Attitude Determination and Control**, D. Reidel, Dordrecht, Holanda, 1978.
- Zanardi, M. C. **Dinâmica da Atitude de Satélites Artificiais**, Tese de Livre Docência, Faculdade de Engenharia – UNESP – Campus de Guaratinguetá, Guaratinguetá- SP, 2005.
- Zill, D. G.; Cullen M. R. **Matemática Avançada para Engenharia**, Bookman, 2009.