



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@ymail.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 (Sehna, 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 |

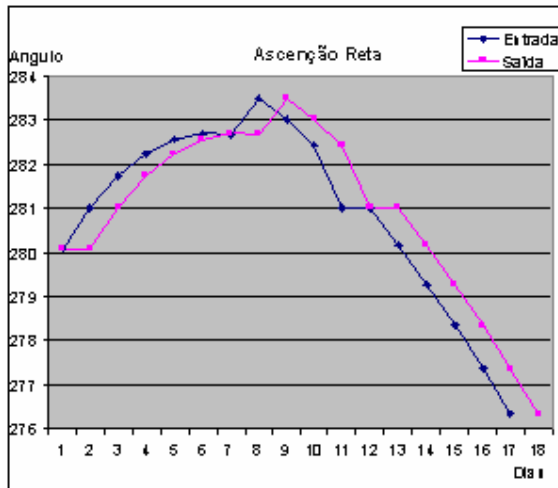


Figura 1 – Comportamento temporal da Ascensão Reta para SCD1 – Configuração 10

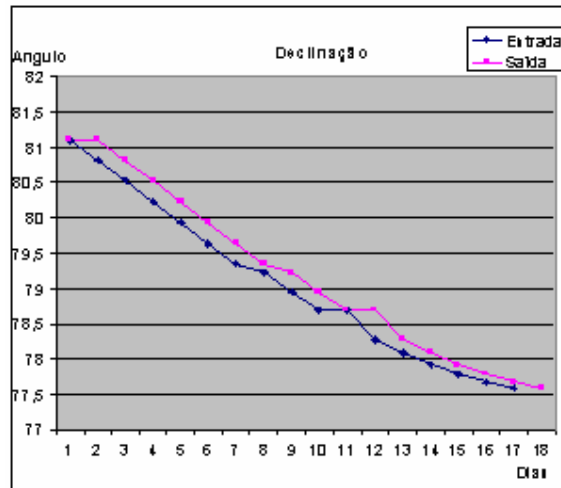


Figura 2 – Comportamento temporal da Declinação para SCD1 – Configuração 10

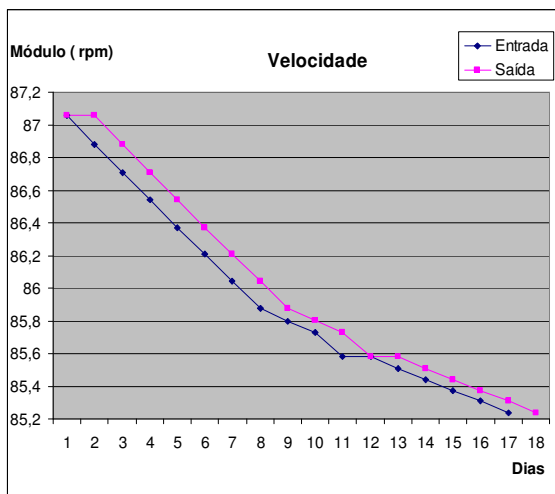


Figura 3 – Comportamento temporal da Velocidade de Rotação para SCD1 – Configuração 10

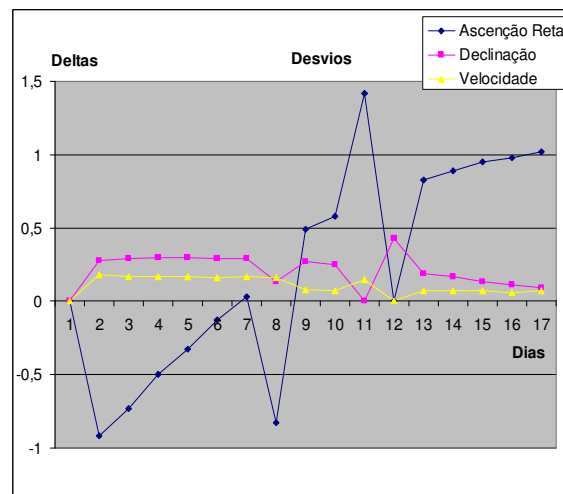


Figura 4 – Comportamento temporal dos Desvios para SCD1 – Configuração 10

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 |

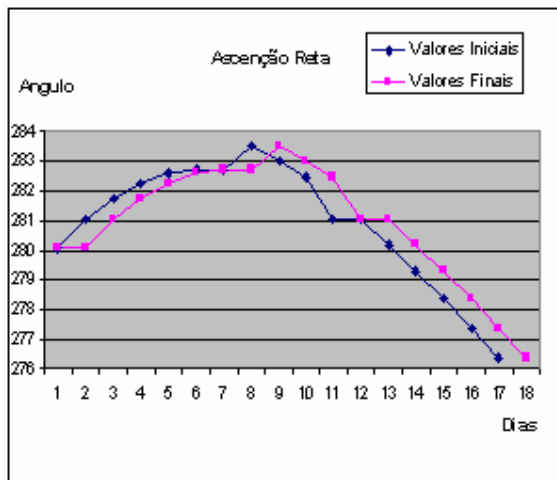


Figura 5 – Comportamento temporal da Ascensão Reta para SCD1 – Configuração 6

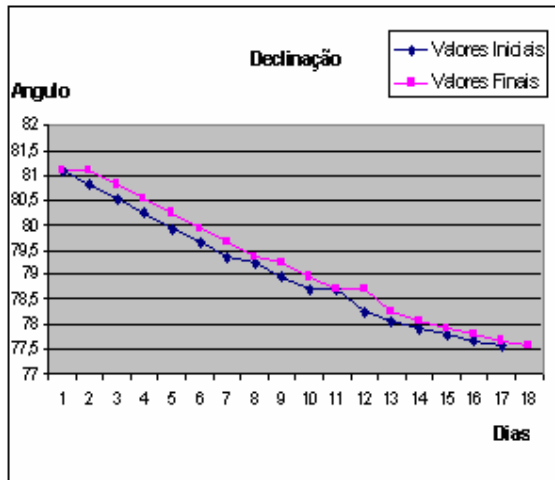


Figura 6 – Comportamento temporal da Declinação para SCD1 – Configuração 6

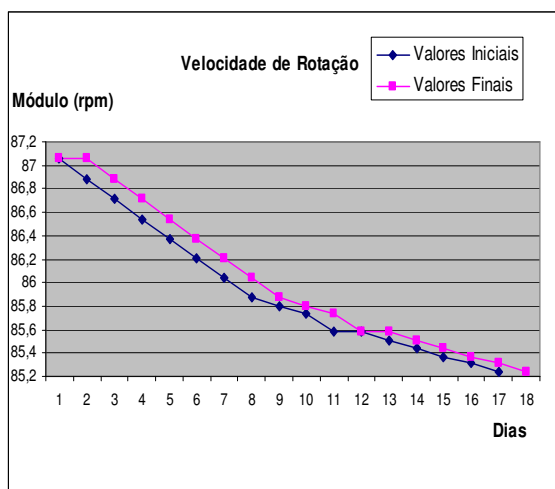


Figura 7 – Comportamento temporal da Velocidade de Rotação para SCD1 – Configuração 6

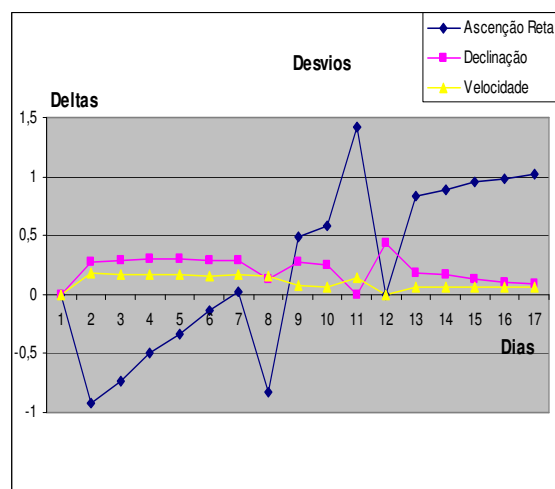


Figura 8 – Comportamento temporal dos Desvios para SCD1 – Configuração 6

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.

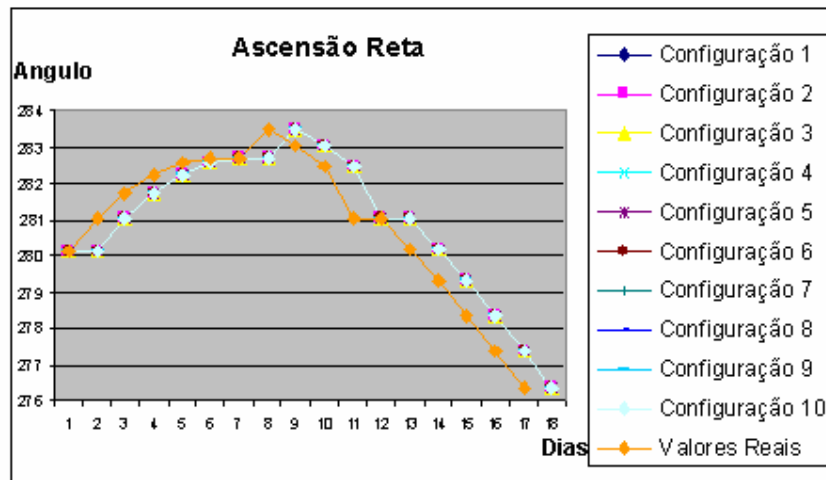


Figura 9 – Comportamento temporal da Ascensão Reta para SCD1

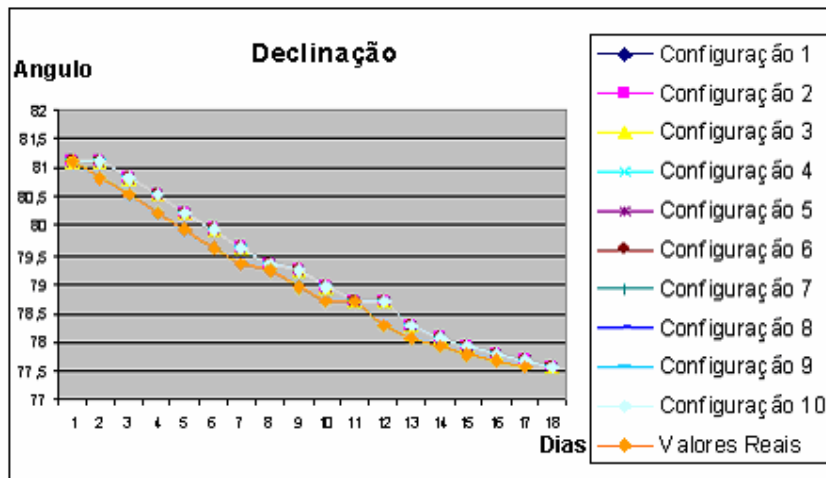


Figura 10 – Comportamento temporal da Declinação para SCD1

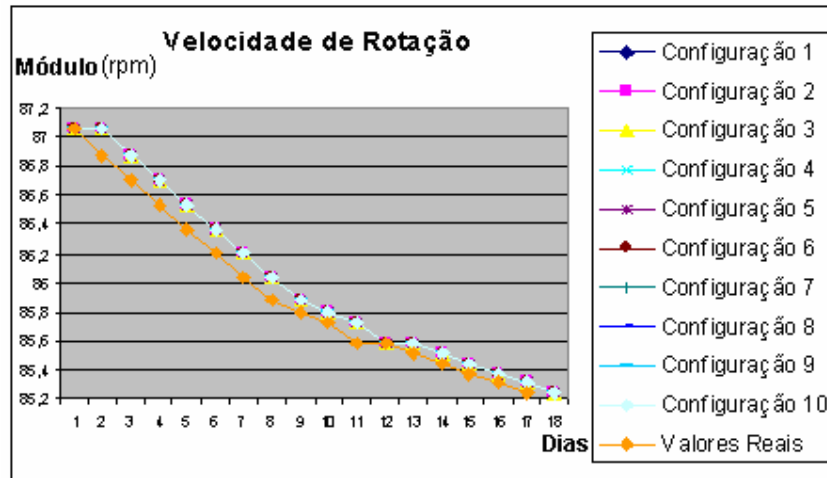


Figura 11 – Comportamento temporal da Velocidade de Rotação para SCD1

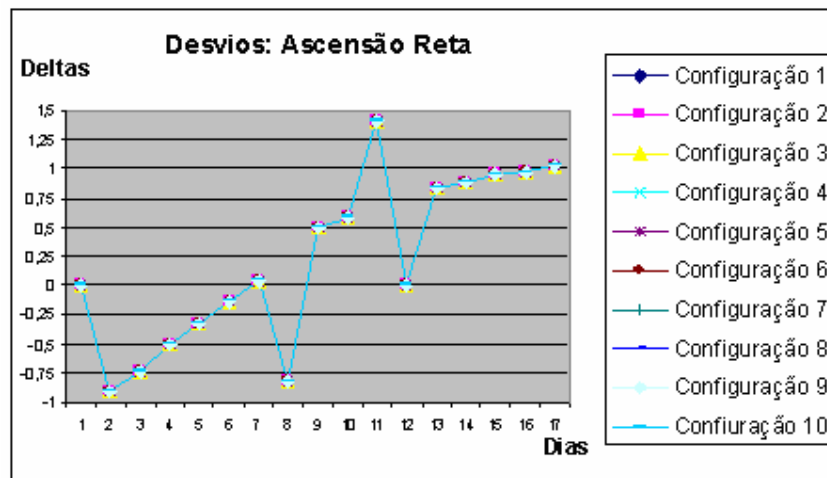


Figura 12 – Comportamento temporal do Desvio da Ascensão Reta para SCD1

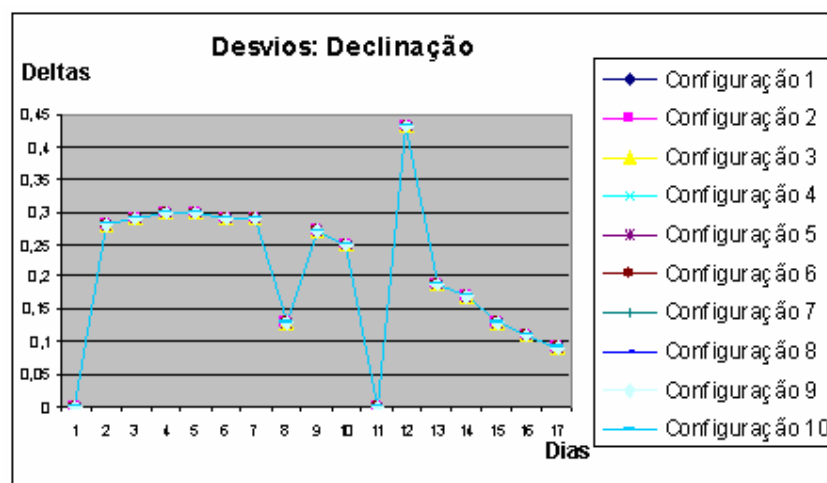


Figura 13 – Comportamento temporal Desvio da Declinação para SCD1

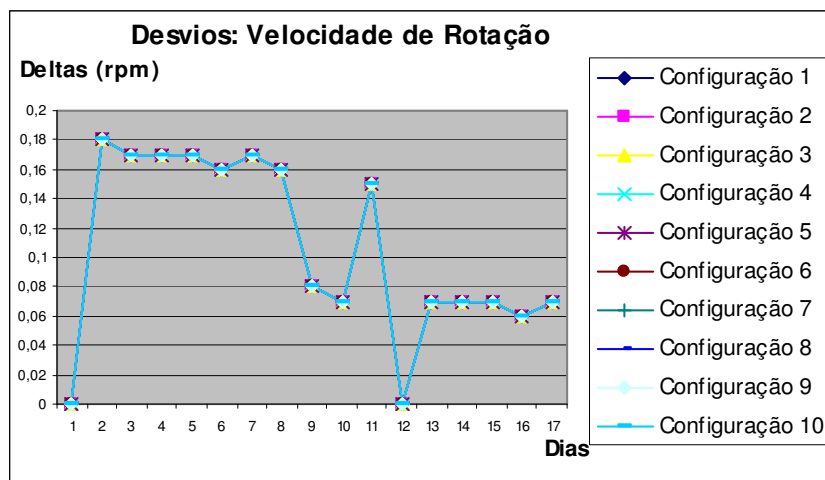


Figura 14 – Comportamento temporal do Desvio da Velocidade de Rotação para SCD1

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 |

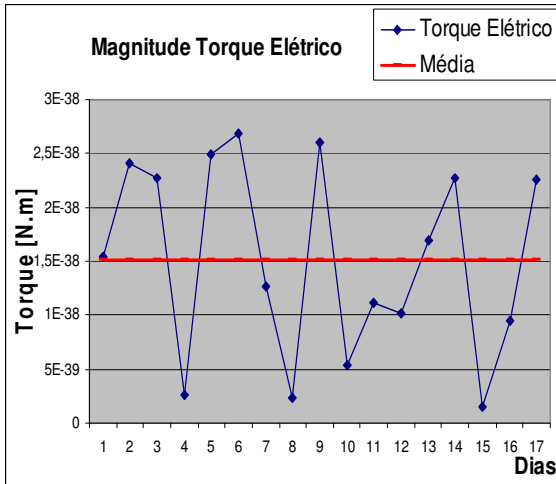


Figura 15 – Comportamento temporal da Magnitude do Torque Elétrico – Configuração 4

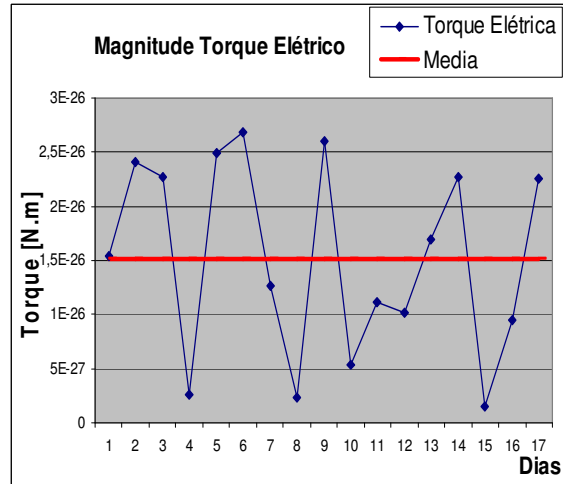


Figura 16 – Comportamento temporal da Magnitude do Torque Elétrico – Configuração 10

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 |

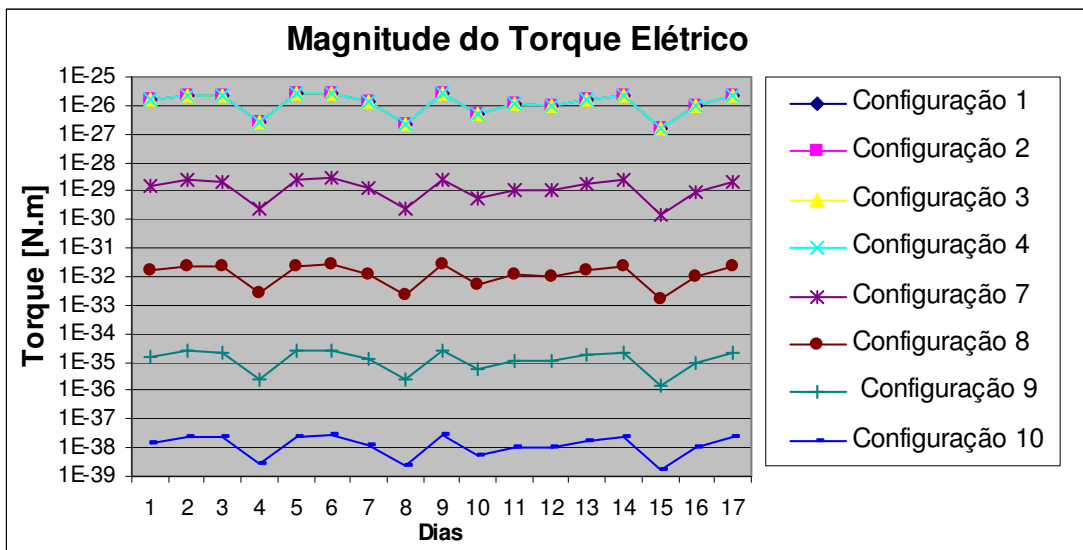


Figura 17 – Comportamento Temporal da Magnitude do Torque Elétrico

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 |

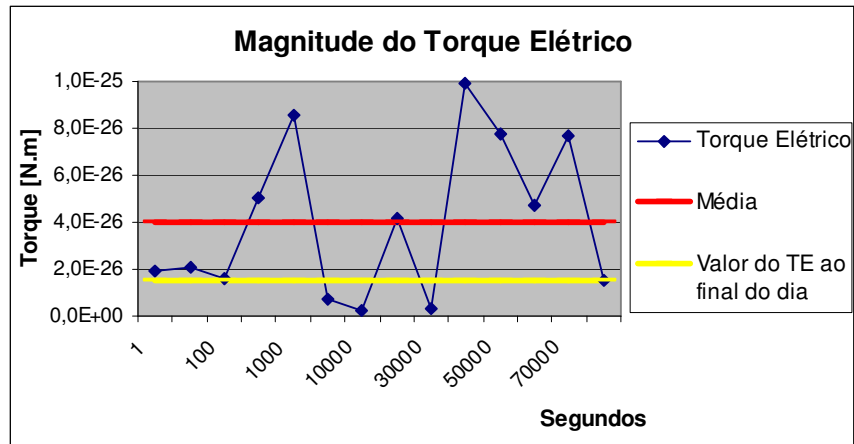


Figura 18 – Evolução Magnitude do Torque Elétrico durante um dia Dia 1 – Configuração 1

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 |

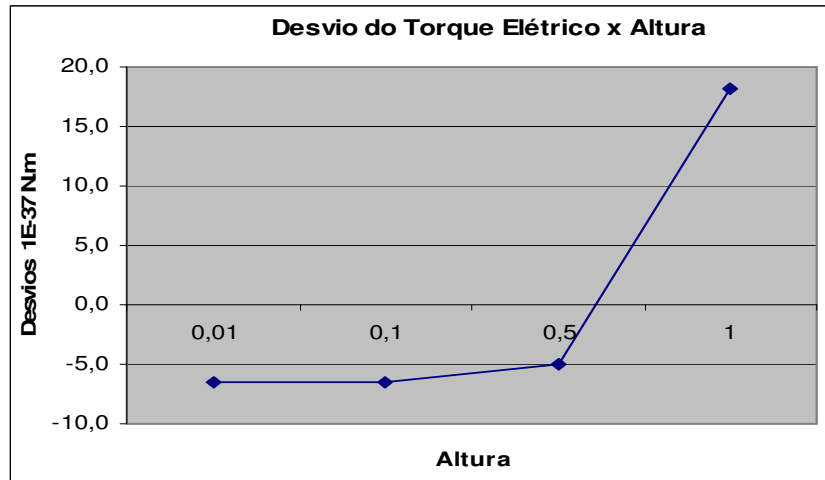


Figura 19 – Desvio do TE em Função da Altura

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 | $1,514698225873640 \cdot 10^{-26}$ |
| $1,00 \cdot 10^{-03}$ | $1,514698297817790 \cdot 10^{-29}$ |
| $1,00 \cdot 10^{-06}$ | $1,514698222049240 \cdot 10^{-32}$ |
| $1,00 \cdot 10^{-09}$ | $1,514698200468160 \cdot 10^{-35}$ |
| $1,00 \cdot 10^{-12}$ | $1,514698218476410 \cdot 10^{-38}$ |

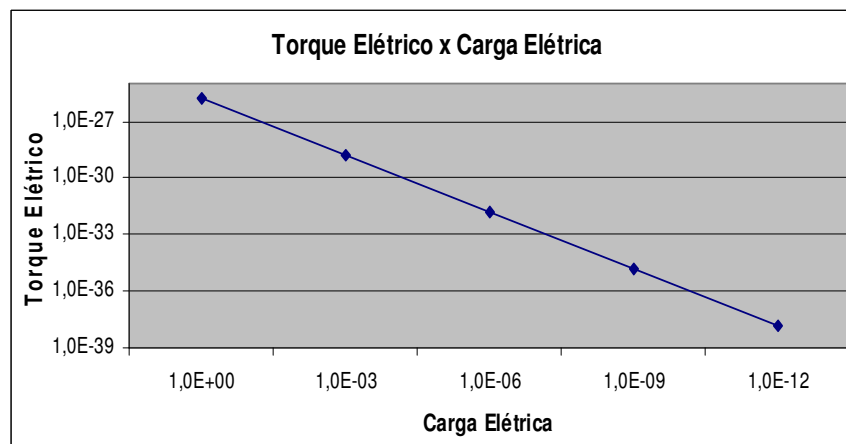


Figura 20 – Magnitude do TE em função da Carga Elétrica

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 |

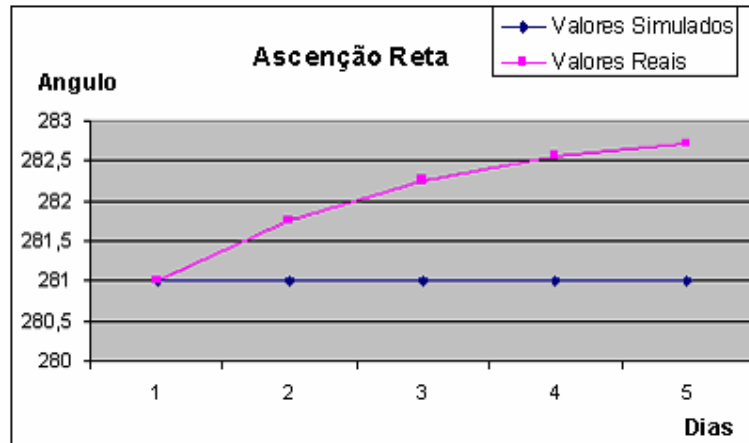


Figura 21 – Resultados da Ascensão Reta para o SCD1 Sem Atualização Diária dos Dados

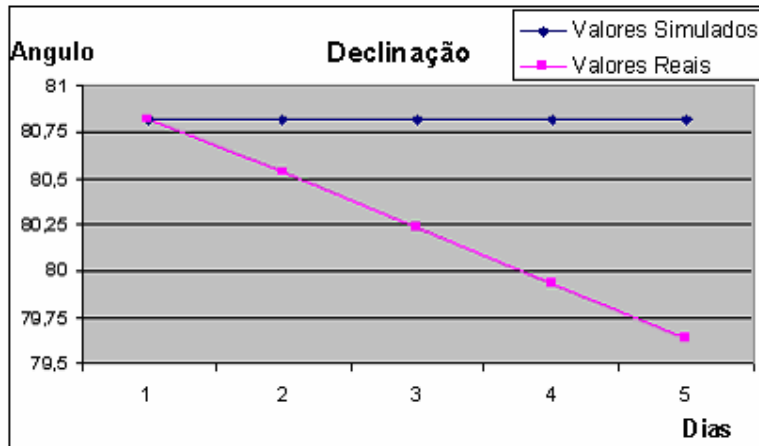


Figura 22 – Resultados da Declinação para o SCD1 sem Atualização Diária dos Dados

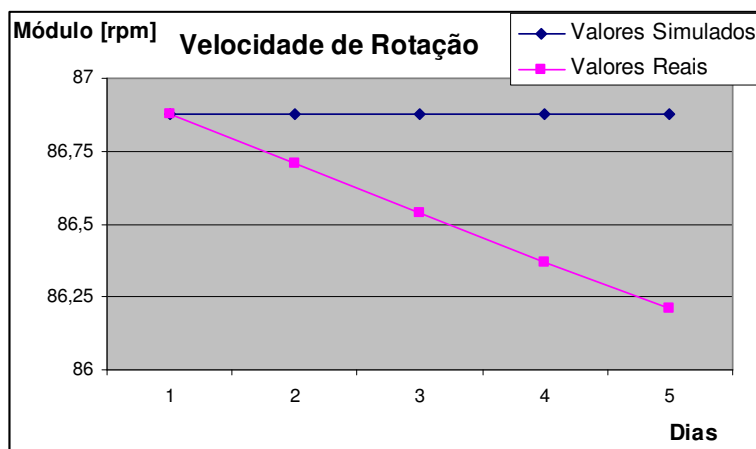


Figura 23 – Resultados da Velocidade de Rotação para o SCD1 sem Atualização Diária dos Dados

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 desvio 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 |

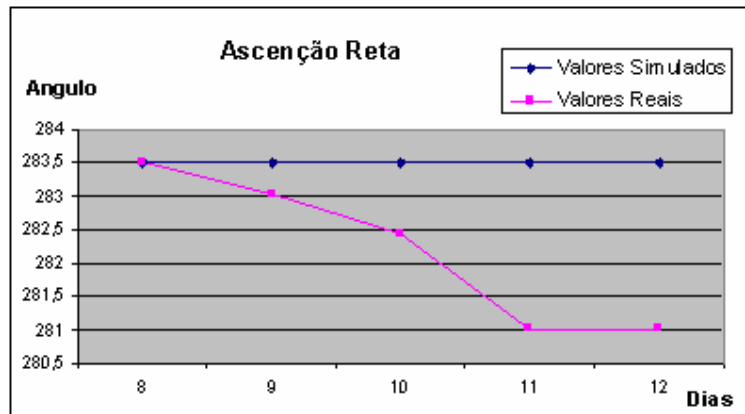


Figura 24 – Resultados da Ascensão Reta para o SCD1 sem Atualização Diária dos Dados

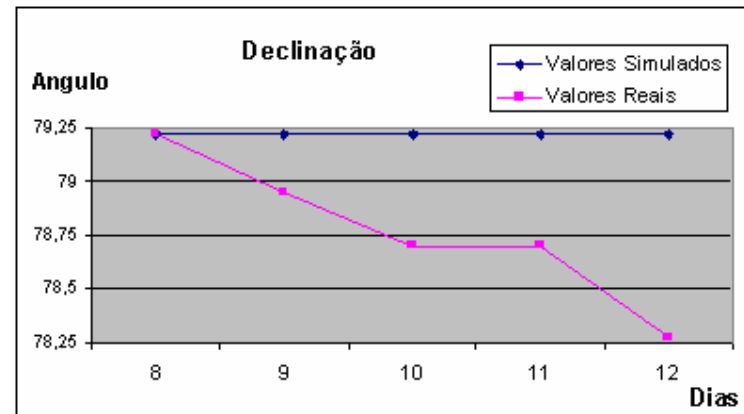


Figura 25 – Resultados da Declinação para o SCD1 sem Atualização Diária dos Dados

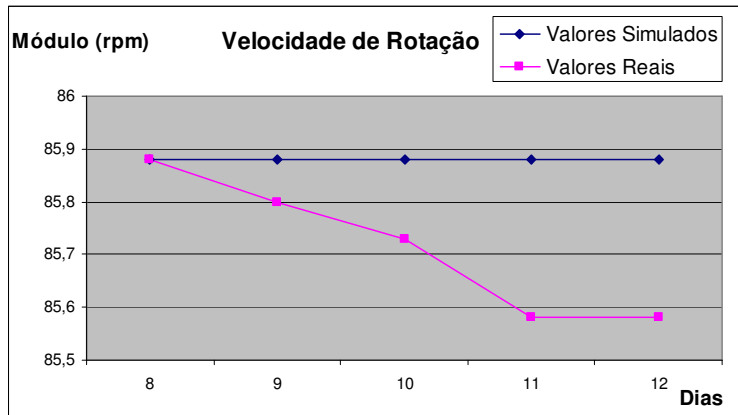


Figura 26 – Resultados da Velocidade de Rotação para o SCD1 sem Atualização Diária dos Dados

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 |

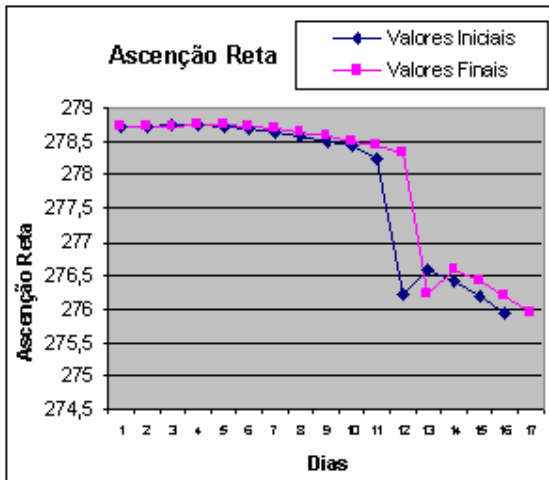


Figura 27 – Comportamento temporal da Ascensão Reta para SCD2 – Configuração 7

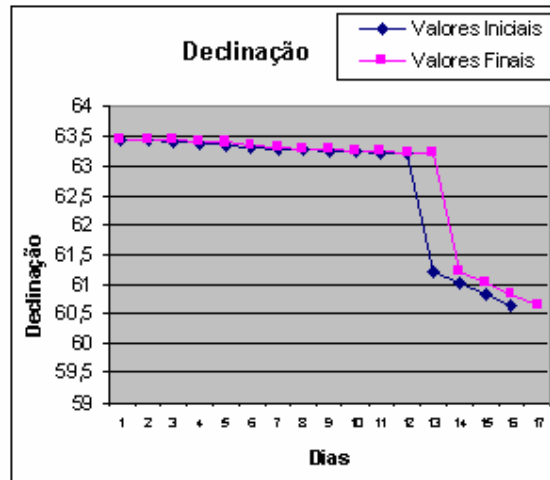


Figura 28 – Comportamento temporal da Declinação para SCD2 – Configuração 7

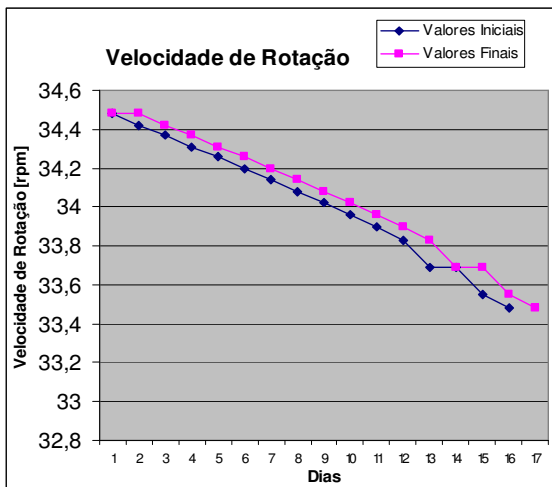


Figura 29 – Comportamento temporal da Velocidade de Rotação para SCD2 – Configuração 7

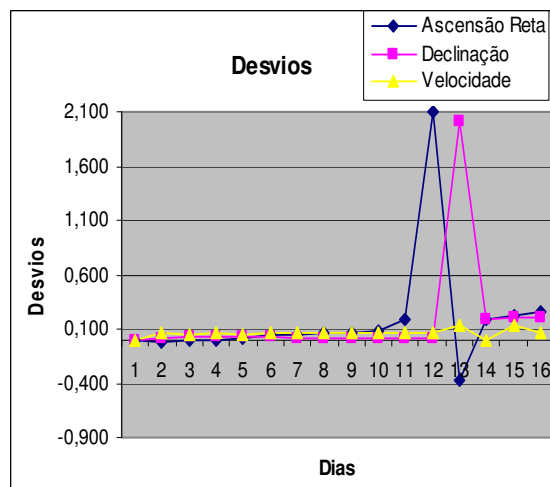


Figura 30 – Comportamento temporal dos Desvios para SCD2 – Configuração 7

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 |

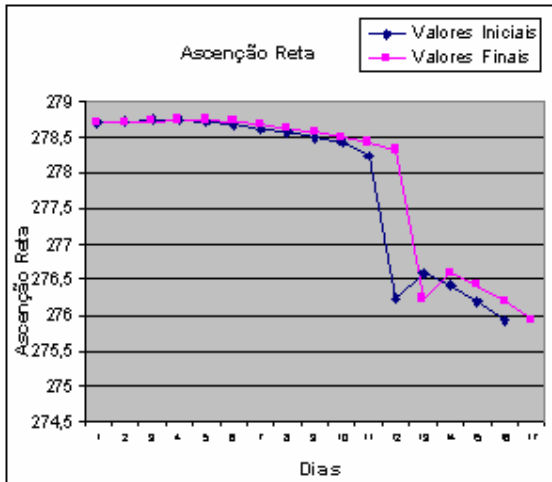


Figura 31 – Comportamento temporal da Ascensão Reta para SCD2 – Configuração 3

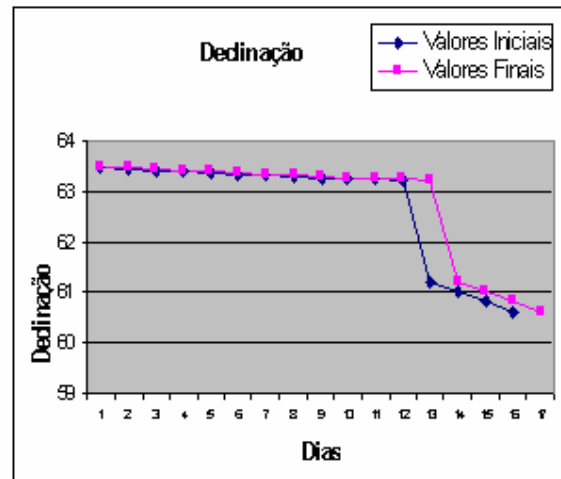


Figura 32 – Comportamento temporal da Declinação para SCD2 – Configuração 3

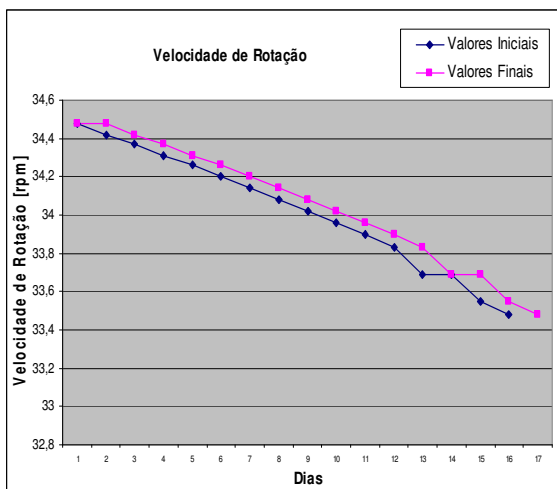


Figura 33 – Comportamento temporal da Velocidade de Rotação para SCD2 – Configuração 3

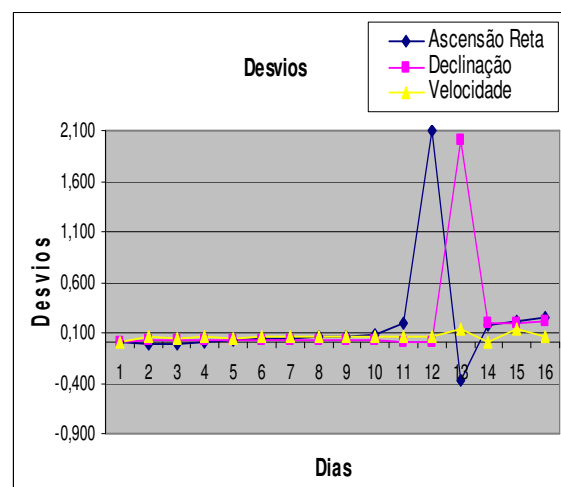


Figura 34 – Comportamento temporal dos Desvios para SCD2 – Configuração 3

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.

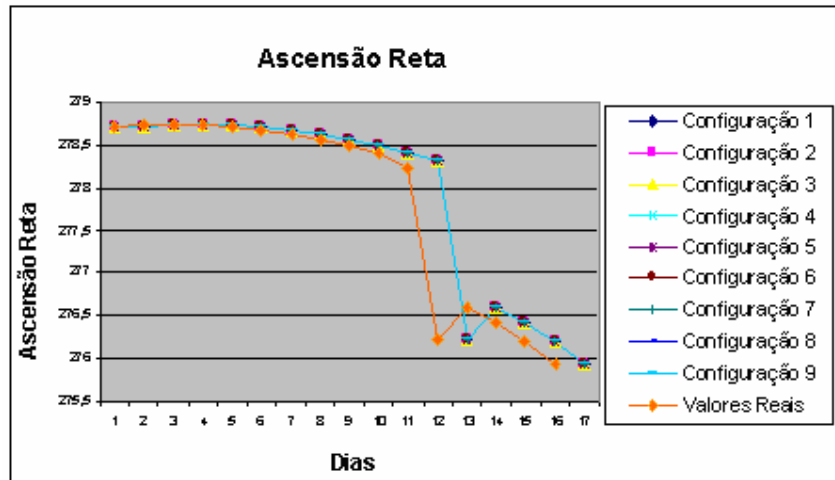


Figura 35 – Comportamento temporal da Ascensão Reta para SCD2

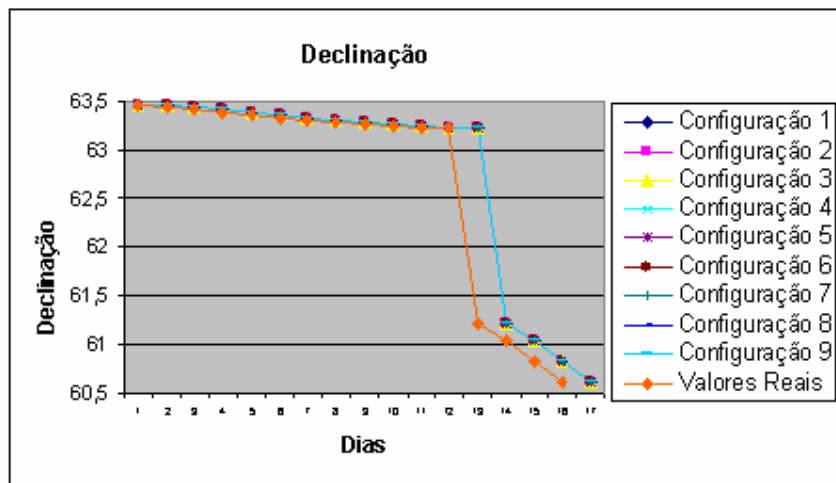


Figura 36 – Comportamento temporal da Declinação para SCD2

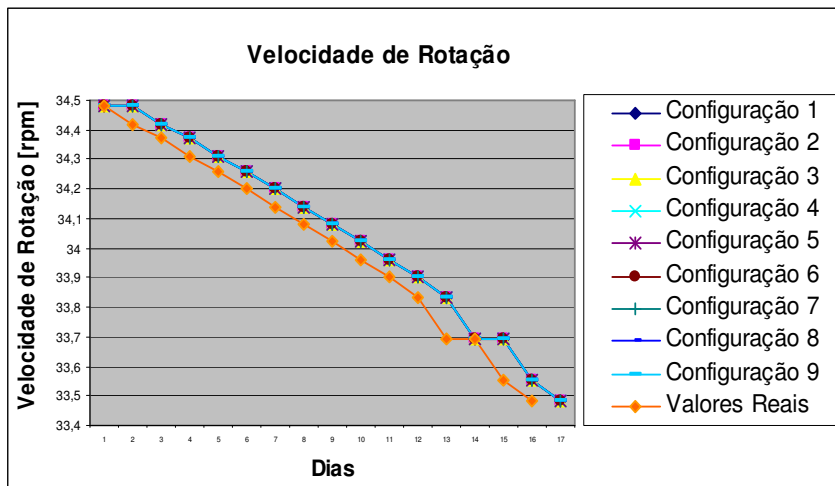


Figura 37 – Comportamento temporal da Velocidade de Rotação para SCD2

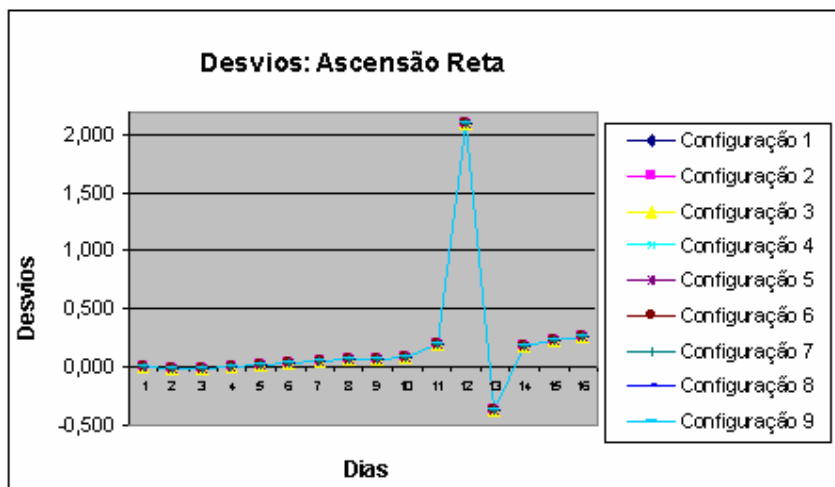


Figura 38 – Comportamento temporal do Desvio da Ascensão Reta para SCD2

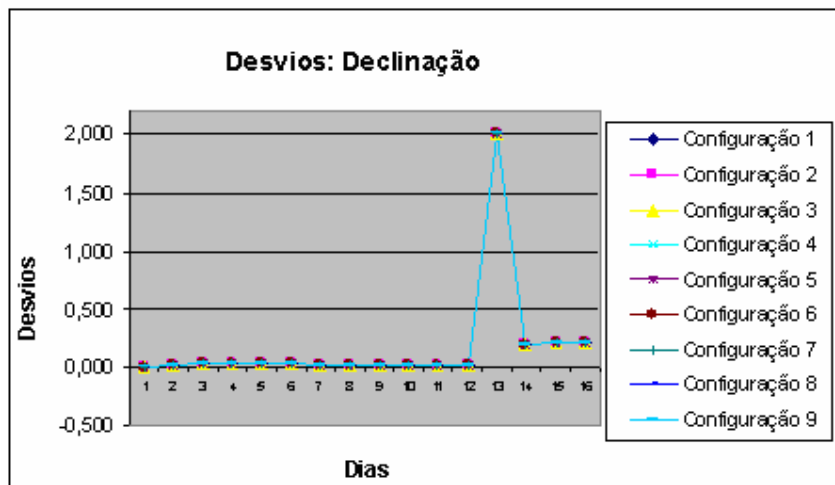


Figura 39 – Comportamento temporal Desvio da Declinação para SCD2

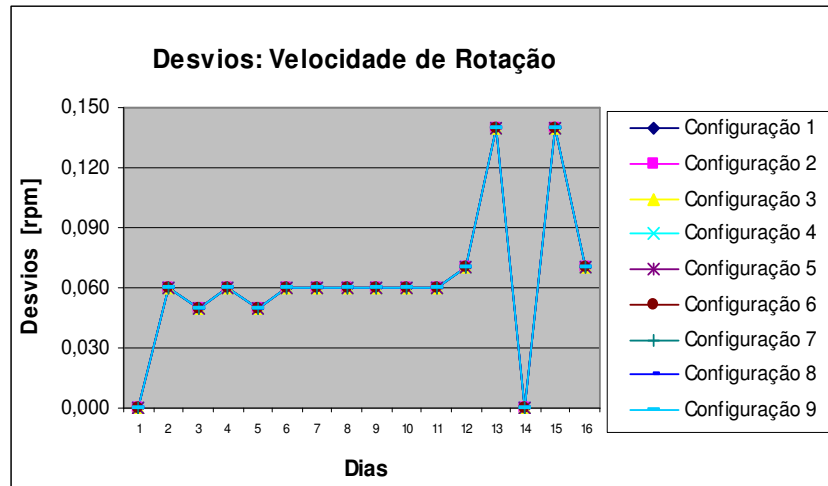


Figura 40 – Comportamento temporal do Desvio da Velocidade de Rotação para SCD2

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 |

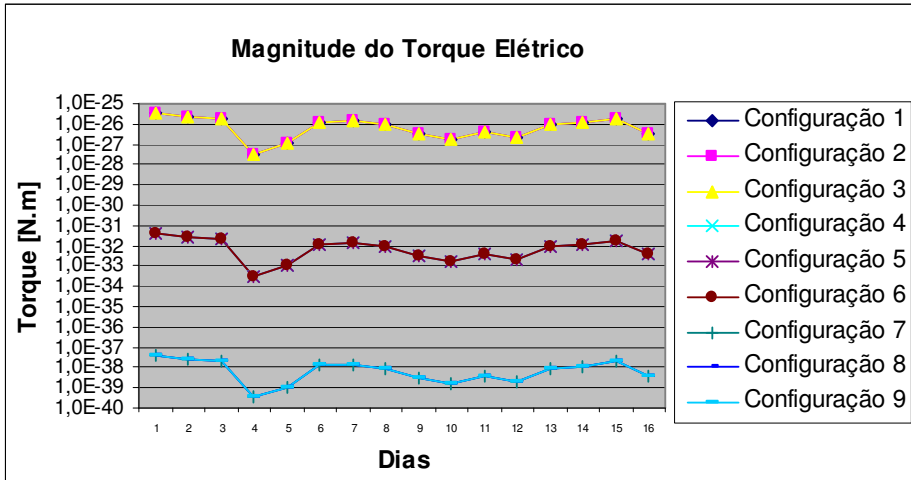


Figura 41 – Comportamento Temporal da Magnitude do Torque Elétrico

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 |

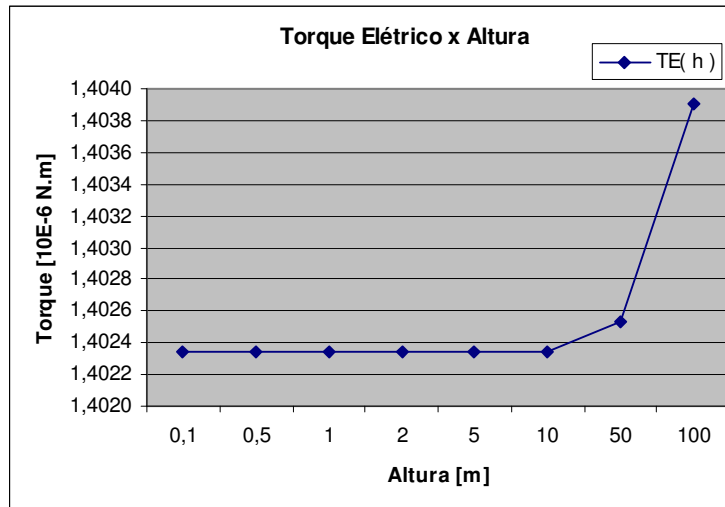


Figura 42 – Variação da Magnitude do TE em Função da Altura – $Q = 1.10^{20} C$

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 .

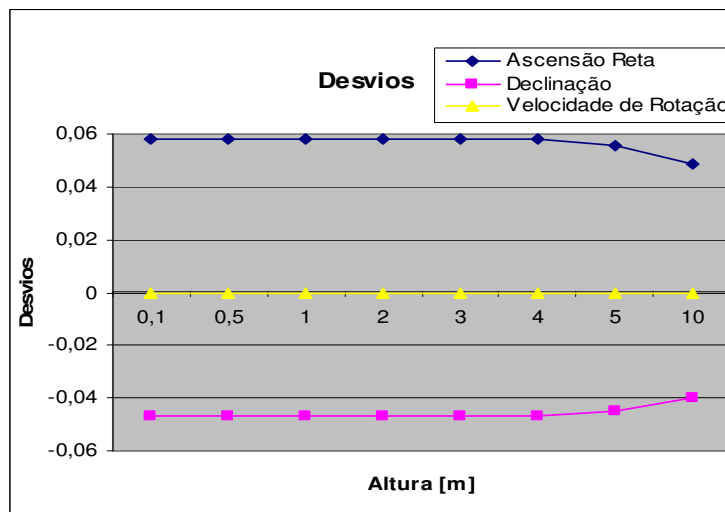


Figura 43 – Desvios em Função da Altura – $Q = 1.10^{20} C$

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 |

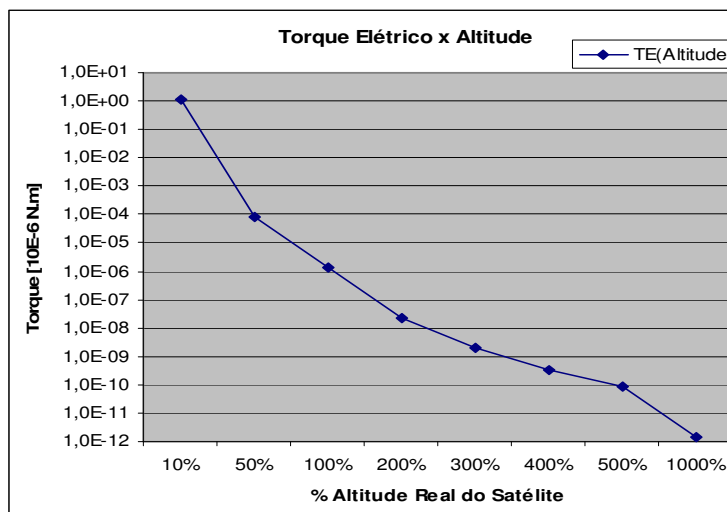


Figura 44 – Variação da Magnitude do TE em Função da Altitude – $Q = 1.10^{20}$ C

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.

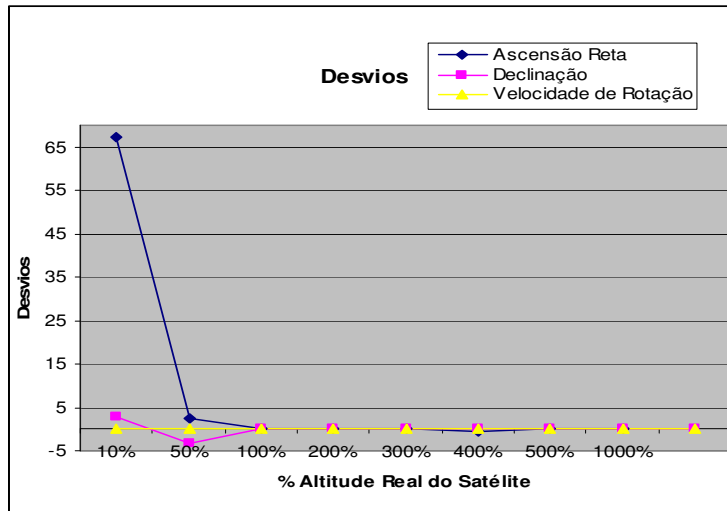


Figura 45 – Desvios em Função da Altitude – $Q = 1.10^{20}$ C

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 |

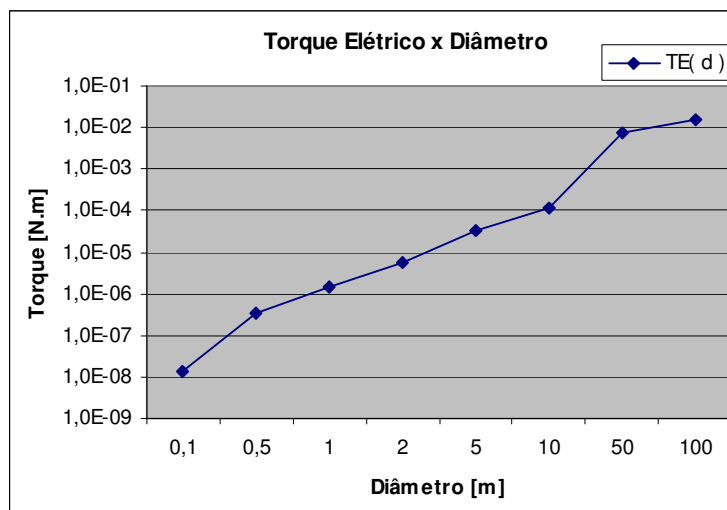


Figura 46 – Variação da Magnitude do TE em Função do Diâmetro – $Q = 1.10^{20}$ C

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 %.

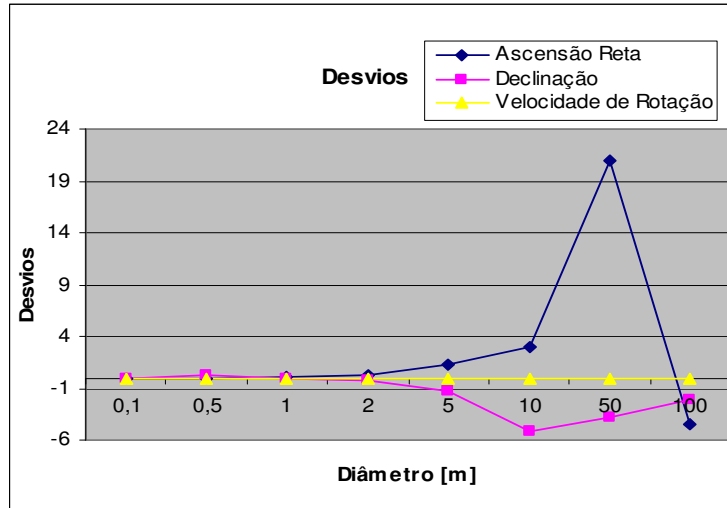


Figura 47 – Desvios em Função do Diâmetro – $Q = 1.10^{20} C$

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 |

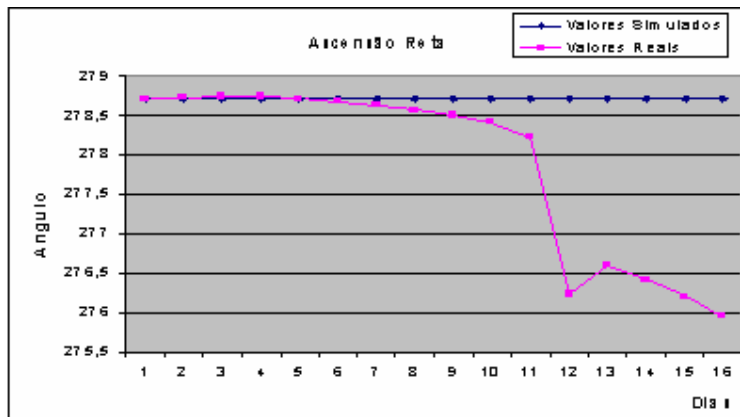


Figura 48 – Resultados da Ascensão Reta para o SCD2 sem Atualização Diária dos Dados

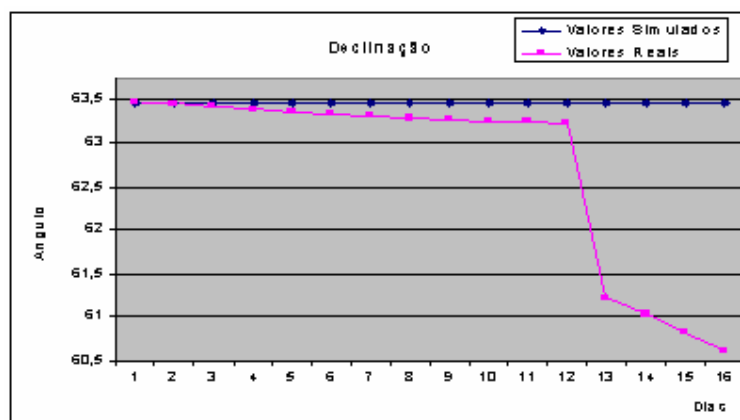


Figura 49 – Resultados da Declinação para o SCD2 sem Atualização Diária dos Dados

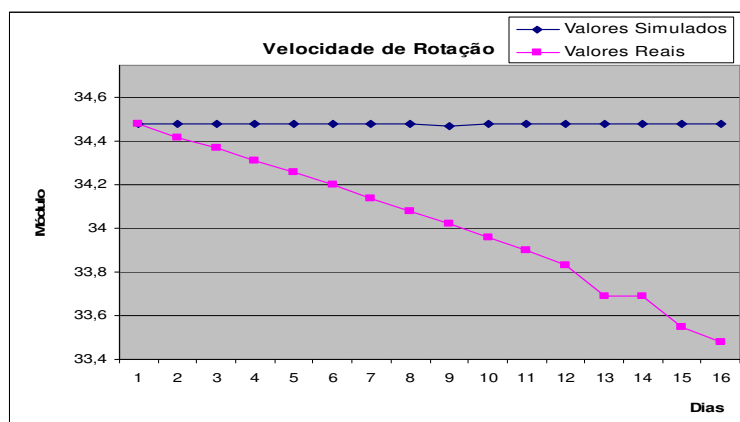


Figura 50 – Resultados da Declinação para o SCD2 sem Atualização Diária dos Dados

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.