



**UTILIZAÇÃO DE MAGNETÔMETRO PARA NAVEGAÇÃO
DE BORDO EM UM CUBESAT**

RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA

(PIBIC/INPE - CNPq/MCT)

PROCESSO Nº. 123149/2008-8

Fernando de Souza Savian - Bolsista PIBIC/INPE – CNPq/MCT
Laboratório de Física Solar do Meio Interplanetário e Magnetosferas
LFSMIM/CRS/INPE – MCT
Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais
CRS/INPE – MCT
e-mail: fsavian@lacesm.ufsm.br

Dr. Roberto Vieira da Fonseca Lopes - Orientador
Divisão de Sistemas Espaciais
DSE/INPE – MCT
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
INPE - MCT
e-mail: roberto@dss.inpe.br

Santa Maria, Julho de 2009



**RELATÓRIO FINAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DO
PROGRAMA: PIBIC/INPE - CNPq/MCT**

PROJETO

**UTILIZAÇÃO DE MAGNETÔMETRO PARA NAVEGAÇÃO
DE BORDO EM UM CUBESAT**

PROCESSO: 123149/2008-8

Relatório elaborado por **Fernando de Souza Savian** relatando as atividades executadas, no período Julho/2008 a Junho/2009, por:

Fernando de Souza Savian - Bolsista PIBIC/INPE – CNPq/MCT
e-mail: fsavian@lacesm.ufsm.br

Dr. Roberto Vieira da Fonseca Lopes - Orientador
Divisão de Sistemas Espaciais – DSE/INPE – MCT
e-mail: roberto@dss.inpe.br

Dr. Nelson Jorge Schuch - Co-Orientador
Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRS/INPE – MCT
e-mail: njschuch@lacesm.ufsm.br

Dr. Nalin Babulal Trivedi – Co-Orientador
Divisão de Geofísica Espacial – DGE/INPE – MCT
e-mail: trivedi@dge.inpe.br



DADOS DE IDENTIFICAÇÃO

Processo CNPq/MCT: N° 123149/2008-8

Bolsista:

Fernando de Souza Savian
Curso de Engenharia Elétrica
Centro de Tecnologia
Universidade Federal de Santa Maria – UFSM

Orientador:

Dr. Roberto Vieira da Fonseca Lopes
Divisão de Sistemas Espaciais – DSE/INPE – MCT

Co-Orientadores:

Dr. Nelson Jorge Schuch
Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRS/INPE – MCT
Dr. Nalin Babulal Trivedi
Divisão de Geofísica Espacial – DGE/INPE – MCT

Colaboradores:

Cassio Espindola Antunes
Acadêmico do Curso de Engenharia Elétrica – UFSM
Josemar de Siqueira
Acadêmico do Curso de Física – UFSM
Willian Rigon Silva
Acadêmico do Curso de Física - UFSM

Local de Trabalho/Execução do projeto:

Laboratório de Física Solar do Meio Interplanetário e Magnetosferas -
LFSMIM/CRS/INPE – MCT.

Trabalho desenvolvido no âmbito da parceria INPE/MCT - UFSM, através do
Laboratório de Ciências Espaciais de Santa Maria - LACESM/CT - UFSM.



Grupo de Pesquisa
**Clima Espacial, Magnetosferas, Geomagnetismo:
Interações Terra - Sol, NanoSatC-Br**



Identificação	Recursos Humanos	Linhas de Pesquisa	Indicadores do Grupo
---------------	------------------	--------------------	----------------------

Identificação

Dados básicos

Nome do grupo: Clima Espacial, Magnetosferas, Geomagnetismo: Interações Terra - Sol, NanoSatC-Br

Status do grupo: **certificado pela instituição**

Ano de formação: 1996

Data da última atualização: 15/06/2009 18:00

Lider(es) do grupo: Nelson Jorge Schuch - nelson.schuch@pq.cnpq.br

Natanael Rodrigues Gomes - natanael.gomes@lagesm.ufsm.br

Área predominante: Ciências Exatas e da Terra; Geociências

Instituição: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Órgão: Coordenação de Gestão Científica - CIE

Unidade: Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais - CRS

Endereço

Logradouro: Caixa Postal 5021

Bairro: Camobi

CEP: 97110970

Cidade: Santa Maria

UF: RS

Telefone: 33012026

Fax: 33012030

E-mail: njschuch@lagesm.ufsm.br

Home page: <http://>

Repercussões dos trabalhos do grupo

O Grupo - CLIMA ESPACIAL, MAGNETOSFERAS, GEOMAGNETISMO:INTERAÇÃO TERRA-SOL do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais - CRS/INPE-MCT, em Santa Maria, e Observatório Espacial do Sul - OES/CRS/INPE - MCT, Lat. 29°26'24"S, Long. 53°48'38"W, Alt. 488m, em São Martinho da Serra, RS, criado por Nelson Jorge Schuch em 1996, colabora com pesquisadores da: UFSM (CT-LACESM), INPE, CRAAM-Universidade P. Mackenzie, IAG/USP, OV/ON, DPD/UNIVAP e SEFET/GO, no Brasil e Internacionais do: Japão (Universidades: Shinshu, Nagoya, Kyushu, Takushoku e National Institute of Polar Research), EUA ((Bartol Research Institute/University of Delaware e NASA (Jet Propulsion Laboratory e Goddard Space Flight Center)), Alemanha (University of Greifswald e Max Planck Institute for Solar System Research), Austrália (Australian Government Antarctic Division e University of Tasmania), Armênia (Alikhanyan Physics Institute) e Kuwait (Kuwait University). Linhas de Pesquisas: MEIO INTERPLANETÁRIO - CLIMA ESPACIAL, MAGNETOSFERAS x GEOMAGNETISMO, AERONOMIA - IONOSFERAS x AEROLUMINESCÊNCIA, NANOSATC-BR. Áreas de interesse: Heliosfera, Física Solar, Meio Interplanetário, Clima Espacial, Magnetosferas, Geomagnetismo, Aeronomia, Ionosferas, Aeroluminescência, Raios Cósmicos, Muons, Pequenos Satélites Científicos. Objetivos: Pesquisar o acoplamento energético na Heliosfera, mecanismos de geração de energia no Sol, Vento Solar, sua propagação no Meio Interplanetário, acoplamento com as magnetosferas planetárias, no Geoespaço com a ionosfera e a Atmosfera Superior, previsão de ocorrência de tempestades magnéticas e das intensas correntes induzidas na superfície da Terra, Eletricidade Atmosférica e seus Eventos Luminosos Transientes (TLEs). As Pesquisas base de dados de sondas no Espaço Interplanetário e dentro de magnetosferas planetárias, e de modelos computacionais físicos e estatísticos. Vice-Líderes: Alisson Dal Lago, Nalin



Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRS/INPE–MCT
Relatório Final de Atividades 2009

Babulau Trivedi, Otávio Santos Cupertino Durão, Natanael Rodrigues Gomes.

Recursos humanos		
Pesquisadores		Total: 42
<u>Ademar Michels</u>	<u>Jean Pierre Raulin</u>	
<u>Alan Prestes</u>	<u>Joao Paulo Minussi</u>	
<u>Alicia Luisa Clúa de Gonzalez</u>	<u>Jose Humberto Andrade Sobral</u>	
<u>Alisson Dal Lago</u>	<u>Juliano Moro</u>	
<u>Antonio Claret Palerosi</u>	<u>Mangalathayil Ali Abdu</u>	
<u>Barclay Robert Clemesha</u>	<u>Marcelo Barcellos da Rosa</u>	
<u>Caitano Luiz da Silva</u>	<u>Marco Ivan Rodrigues Sampaio</u>	
<u>Carlos Roberto Braga</u>	<u>Marcos Vinicius Dias Silveira</u>	
<u>Clezio Marcos De Nardin</u>	<u>Nalin Babulau Trivedi</u>	
<u>Cristiano Max Wrasse</u>	<u>Natanael Rodrigues Gomes</u>	
<u>Delano Gobbi</u>	<u>Nelson Jorge Schuch</u>	
<u>Eurico Rodrigues de Paula</u>	<u>Nivaor Rodolfo Rigozo</u>	
<u>Ezequiel Echer</u>	<u>Odim Mendes Junior</u>	
<u>Fabiano Luis de Sousa</u>	<u>Osmar Pinto Junior</u>	
<u>Fábio Augusto Vargas dos Santos</u>	<u>Otavio Santos Cupertino Durão</u>	
<u>Fernanda de São Sabbas Tavares</u>	<u>Pawel Rozenfeld</u>	
<u>Fernando Luis Guarneri</u>	<u>Petrônio Noronha de Souza</u>	
<u>Gelson Lauro Dal' Forno</u>	<u>Polinaya Muralikrishna</u>	
<u>Hisao Takahashi</u>	<u>Rajaram Purushottam Kane</u>	
<u>Ijar Milagre da Fonseca</u>	<u>Severino Luiz Guimaraes Dutra</u>	
<u>Jean Carlo Santos</u>	<u>Walter Demetrio Gonzalez Alarcon</u>	
Estudantes		Total: 32
<u>Aline Seeger Santos</u>	<u>Jose Fernando Thuorst</u>	
<u>Bernardo Henz</u>	<u>Josemar de Siqueira</u>	
<u>Carlos Pinto da Silva Neto</u>	<u>Lilian Piecha Moor</u>	
<u>Cassio Espindola Antunes</u>	<u>Lucas Antunes Tambara</u>	
<u>Cássio Rodinei dos Santos</u>	<u>Lucas Lopes Costa</u>	
<u>Celito Muck Felipetto</u>	<u>Lucas Ramos Vieira</u>	
<u>Claudio Machado Paulo</u>	<u>Luis Fernando Nicolini</u>	
<u>Cristiano Sarzi Machado</u>	<u>Nikolas Kemmerich</u>	
<u>Eduardo Escobar Bürger</u>	<u>Rafael Lopes Costa</u>	
<u>Eduardo Weide Luiz</u>	<u>Ricardo Cartier dos Santos</u>	
<u>Felipe Cipriani Luzzi</u>	<u>Rodrigo da Rosa Azambuja</u>	
<u>Fernando de Souza Savian</u>	<u>Rubens Zolar Gehlen Bohrer</u>	
<u>Guilherme Aluizio Steffens Lorenset</u>	<u>Tardelli Ronan Coelho Stekel</u>	
<u>Guilherme Grams</u>	<u>Thalis José Girardi</u>	
<u>Guilherme Simon da Rosa</u>	<u>Tiago Jaskulski</u>	
<u>Igor Freitas Fagundes</u>	<u>Willian Rigon Silva</u>	
Técnicos		Total: 2
Eduardo Ceretta Dalla Favera - Ensino Profissional de nível técnico - Técnico em Computação		
Vinicius Ceregati Costa - Graduação - Outra Função		
Linhas de pesquisa		Total: 4



- [AERONOMIA - IONOSFERAS x AEROLUMINESCÊNCIA](#)
- [Desenvolvimento de CubeSats - NANOSATC-BR](#)
- [MAGNETOSFERAS x GEOMAGNETISMO](#)
- [MEIO INTERPLANETÁRIO - CLIMA ESPACIAL](#)

Indicadores de recursos humanos do grupo	
Integrantes do grupo	Total
Pesquisador(es)	42
Estudante(s)	32
Técnico(s)	



Diretório dos Grupos de Pesquisa no Brasil



Linha de Pesquisa
MAGNETOSFERAS x GEOMAGNETISMO

Linha de pesquisa
MAGNETOSFERAS x GEOMAGNETISMO

Nome do grupo: *Clima Espacial, Magnetosferas, Geomagnetismo: Interações Terra - Sol, NanoSatC-Br*

Palavras-chave: Anomalia Magnética do Atlântico Sul - AMAS; Desenvolvimento de Instrumentação Espacial; Eletricidade Atmosférica - Descargas Elétricas; Física Magnetosferas, Física Solar e Heliosférica; Geomagnetismo; Magnetômetros;

Pesquisadores:

[Alisson Dal Lago](#)
[Clezio Marcos De Nardin](#)
[Gelson Lauro Dal' Forno](#)
[Jean Carlo Santos](#)
[Joao Paulo Minussi](#)
[Mangalathayil Ali Abdu](#)
[Nalin Babulal Trivedi](#)
[Nivaor Rodolfo Rigozo](#)
[Osmar Pinto Junior](#)
[Pawel Rozenfeld](#)
[Severino Luiz Guimaraes Dutra](#)

Estudantes:

[Aline Seeger Santos](#)
[Cassio Espindola Antunes](#)
[Celito Muck Felipetto](#)
[Claudio Machado Paulo](#)
[Fernando de Souza Savian](#)
[Josemar de Siqueira](#)
[Rubens Zolar Gehlen Bohrer](#)
[Willian Rigon Silva](#)

Árvore do conhecimento:

Ciências Exatas e da Terra; Geociências; Geofísica; Geofísica Aplicada;
 Ciências Exatas e da Terra; Geociências; Geofísica Espacial;



Ciências Exatas e da Terra; Geociências; Instrumentação Científica;

Setores de aplicação:

Produtos e serviços voltados para a defesa e proteção do meio ambiente, incluindo o desenvolvimento sustentado

Objetivo:

Pesquisas: acoplamento da Heliosfera, Meio Interplanetário e Magnetosferas Planetárias, com dados de sondas espaciais e nas magnetosferas; modelos físicos/estatísticos; variação secular do Campo Total-F, 22883 nT no OES, na razão -28 nT/ano; deslocamento para oeste da AMAS observado desde 1985, via Cooperação: UFSM-ON-INPE com o SERC/KU-Japão; pulsações contínuas e/ou impulsivas observadas na componente H amplificadas pela precipitação na região da AMAS. Vice-Líder: Nalin Babulau Trivedi.



Diretório dos Grupos de Pesquisa no Brasil



Linha de Pesquisa
MEIO INTERPLANETÁRIO - CLIMA ESPACIAL

Linha de pesquisa

MEIO INTERPLANETÁRIO - CLIMA ESPACIAL

Nome do grupo: Clima Espacial, Magnetosferas, Geomagnetismo: Interações Terra - Sol, NanoSatC-Br

Palavras-chave: Campo Magnético Interplanetário; Muons; Raios Cósmicos; Tempestade Geomagnética;

Pesquisadores:

Alan Prestes
Alicia Luisa Clúa de Gonzalez
Alisson Dal Lago
Carlos Roberto Braga
Ezequiel Echer
Fernando Luís Guarnieri
Jean Pierre Raulin
Juliano Moro
Marcos Vinicius Dias Silveira
Nelson Jorge Schuch
Nivaor Rodolfo Rigozo
Rajaram Purushottam Kane
Severino Luiz Guimaraes Dutra
Walter Demetrio Gonzalez Alarcon

Estudantes:

Aline Seeger Santos
Claudio Machado Paulo
Eduardo Escobar Bürger
Guilherme Grams
Jose Fernando Thuorst
Josemar de Siqueira
Lucas Antunes Tambara
Lucas Ramos Vieira
Luis Fernando Nicolini
Nikolas Kemmerich
Tardelli Ronan Coelho Stekel

Árvore do conhecimento:

Ciências Exatas e da Terra; Geociências; Geofísica Espacial;



Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRS/INPE–MCT
Relatório Final de Atividades 2009

Ciências Exatas e da Terra; Astronomia; Astrofísica do Sistema Solar;
Ciências Exatas e da Terra; Geociências; Instrumentação Científica;

Setores de aplicação:

Aeronáutica e espaço

Objetivo:

Pesquisar e prover em tempo real com o Telescópio Multidirecional de Raios Cósmicos-Muons, 2x(4mx7m), >50GeV, no Observatório Espacial do Sul, o monitoramento de muons e fenômenos das interações Sol-Terra, a previsão no Geoespaço de eventos solares e distúrbios geofísicos, graves efeitos das tempestades e subtempestades geomagnéticas sobre dispositivos e sistemas tecnológicos afetando equipes de trabalho e equipamentos na superfície da Terra e no Espaço. Vice-Líder: Alisson Dal Lago.



Diretório dos Grupos de Pesquisa no Brasil



Linha de Pesquisa
Desenvolvimento de CubeSats - NANOSATC-BR

Linha de pesquisa
Desenvolvimento de CubeSats - NANOSATC-BR

Nome do grupo: Clima Espacial, Magnetosferas, Geomagnetismo: Interações Terra - Sol, NanoSatC-Br

Palavras-chave: CubeSats; Desenvolvimento de Engenharias - Tecnologias; Miniaturização; Nanosatélites; Nanotecnologia; Pesquisa do Geoespaço;

Pesquisadores:

Ademar Michels
Alicia Luisa Clúa de Gonzalez
Alisson Dal Lago
Antonio Claret Palerosi
Clezio Marcos De Nardin
Ezequiel Echer
Fabiano Luis de Sousa
Fernando Luís Guarnieri
Ijar Milagre da Fonseca
Jean Pierre Raulin
Jose Humberto Andrade Sobral
Nalín Babulal Trivedi
Natanael Rodrigues Gomes
Nelson Jorge Schuch
Nivaor Rodolfo Rigozo
Odim Mendes Junior
Otávio Santos Cupertino Durão
Pawel Rozenfeld
Petrônio Noronha de Souza
Severino Luiz Guimaraes Dutra
Walter Demetrio Gonzalez Alarcon

Estudantes:

Bernardo Henz
Cassio Espindola Antunes
Celito Muck Felipetto
Eduardo Escobar Bürger
Fernando de Souza Savian
Guilherme Grams
Guilherme Simon da Rosa



Igor Freitas Faundes
Jose Fernando Thuorst
Josemar de Siqueira
Lucas Antunes Tambara
Lucas Lopes Costa
Lucas Ramos Vieira
Luis Fernando Nicolini
Nikolas Kemmerich
Rafael Lopes Costa
Ricardo Cartier dos Santos
Rubens Zolar Gehlen Bohrer
Tardelli Ronan Coelho Stekel
Tiago Jaskulski
Willian Rigon Silva

Árvore do conhecimento:

Ciências Exatas e da Terra; Astronomia; Astrofísica do Sistema Solar;
Ciências Exatas e da Terra; Geociências; Instrumentação Científica;
Engenharias; Engenharia Aeroespacial; Engenharia Aeroespacial - Pequenos Satélites;

Setores de aplicação:

Aeronáutica e espaço

Objetivo:

Pesquisas: Geoespaço e em Engenharias/Tecnologias: eletrônica, comunicações, mecânica, lançamento de pequenos satélites científico universitário - iniciação científica: CubeSat (100g-1Kg, 10x10x10cm), Nanosatélite (1Kg-10Kg); Carga útil: magnetômetro e detector de partículas; Desenvolvimentos: estrutura mecânica, computador-bordo, programas, estação terrena, testes/integração, sub-sistemas: potencia, propulsão, telemetria, controle: atitude, térmico, Vice-Líder: Otávio Santos Cupertino Durão.



Agradecimentos

Agradeço ao Dr. Nelson Jorge Schuch, por ter proporcionado ótimas condições para o desenvolvimento e conclusão do projeto aqui referido, além de ser de importância fundamental em minha motivação durante o projeto. Sou grato ao meu orientador, Dr. Roberto Vieira da Fonseca Lopes, e ao meu co-orientador, Dr. Nalin Babulal Trivedi, pela grande dedicação e paciência demonstradas durante todo o período desse projeto.

Da mesma forma, sou muito agradecido aos meus colegas de Laboratório, que jamais mediram esforços para auxiliar em todos os momentos, demonstrando grande amizade e companheirismo. São eles: Cassio Espindola Antunes, Josemar de Siqueira e Willian Rigon Silva.

Agradeço aos meus pais, José Flores Savian e Fátima Marilusa de Souza Savian, que me apoiaram em todo esse ano de Projeto, sempre me auxiliando nos momentos difíceis e procurando me dar total suporte para seguir em frente em minha caminhada.

Meus sinceros agradecimentos: (i) aos funcionários, servidores do CRS/INPE - MCT e do LACESM/CT – UFSM pelo apoio e pela infra-estrutura disponibilizada; (ii) ao Programa PIBIC/INPE - CNPq/MCT pela aprovação do Projeto de Pesquisa, que me permitiu dar os primeiros passos na iniciação científica e tecnológica, propiciando grande crescimento profissional; (iii) ao Coordenador Dr. José Carlos Becceneri e a Secretária do Programa PIBIC/INPE - CNPq/MCT, Sra. Egidia Inácio da Rosa, pelo constante apoio, alertas e sua incansável preocupação com toda a burocracia e datas limites do Programa para com os bolsistas de I. C. & T do CRS/INPE - MCT.

A todos, muito obrigado.



RESUMO

A navegação de bordo de um satélite envolve a determinação e o controle de sua órbita e de sua atitude. Contudo, em certos casos, é possível apenas determinar a atitude e órbita do satélite. Os principais meios para se representar a orientação de um Cubesat são utilizando Ângulos de Euler ou Quatérnions. Ambas as representações convergem para uma matriz de atitude que faz a rotação de um sistema de coordenadas para outro, ou seja, realiza a rotação do sistema de coordenadas de referência para o sistema de coordenadas de observação. A utilização de um magnetômetro para determinação de atitude em um Cubesat se torna interessante devido aos seus baixos valores de custo, tamanho e massa, tendo em vista que precisa atender às limitações de tamanho e massa impostas por esse tipo de satélite. O objetivo deste Projeto de Pesquisa é demonstrar meios de determinação de atitude e órbita através de magnetômetros, enaltecendo as suas vantagens e buscando soluções para possíveis desvantagens de usar esse equipamento.



SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
1.1. OBJETIVOS PRINCIPAIS	1
1.2. O TEMA	1
1.3. A ORGANIZAÇÃO.....	2
CAPÍTULO 2 - MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS	3
CAPÍTULO 3 - DETERMINAÇÃO DE ATITUDE.....	6
3.1. SENSORES DE ATITUDE.....	6
3.1.1. <i>Sensores Inerciais</i>	6
3.1.2. <i>Sensores Referenciais</i>	6
3.2. REPRESENTAÇÃO DE ATITUDE.....	16
3.2.1. <i>Ângulos de Euler</i>	16
3.2.2. <i>Quatérnion</i>	16
3.3. FILTRO DE KALMAN	17
CAPÍTULO 4 - HIPÓTESES SIMPLIFICADORAS.....	18
4.1. ORBITA KEPLERIANA, CIRCULAR.....	18
CAPÍTULO 5 - RESULTADOS OBTIDOS.....	19
CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS DO PROJETO	24
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	26
ANEXOS.....	268
ANEXO A.....	29
ANEXO B.....	32



Lista de Figuras

FIGURA 2.1 - RESÍDUOS OS QUAIS SÃO MINIMIZADOS PELO MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS.....	3
FIGURA 5.1 - ISOCURVAS DO CAMPO GEOMAGNÉTICO A 311 MGAUSS (MODELO DIPOLO).....	20
FIGURA 5.2 - ISOCURVAS DO CAMPO GEOMAGNÉTICO A 450 MGAUSS (MODELO DIPOLO).....	21
FIGURA 5.3 - SELEÇÃO DA INCLINAÇÃO E ALTITUDE DA ÓRBITA.....	21
FIGURA 5.4 - SELEÇÃO DO PERÍODO UTILIZADO NA SIMULAÇÃO DE ÓRBITA DO SATÉLITE.....	22
FIGURA 5.5 - PRIMEIRA PASSAGEM PELO BRASIL, ÀS 21:01H DO DIA 01 DE JULHO DE 2007.	22
FIGURA 5.6 - SEGUNDA PASSAGEM PELO BRASIL, ÀS 09:04:10H DO DIA 02 DE JULHO DE 2007.	23



Capítulo 1 - Introdução

1.1. Objetivos Principais

Através do Programa de Iniciação Científica, Programa PIBIC/INPE - CNPq/MCT, ao qual está vinculado o Projeto, foram planejadas e realizadas atividades de pesquisa no projeto “UTILIZAÇÃO DE MAGNETÔMETRO PARA NAVEGAÇÃO DE BORDO EM UM CUBESAT”. O objetivo principal do Projeto é destacar a importância da navegação de bordo em um Cubesat, principalmente visando a determinação de atitude e órbita desse tipo de satélite. Para isso, houve familiarização com os aspectos práticos, como infra-estrutura de laboratório, hardware, software e todo equipamento necessário para a utilização de um magnetômetro em um Cubesat. Da mesma forma, é importante visar dentre os objetivos das atividades de pesquisa o aprendizado sobre métodos de determinação de atitude através de magnetômetros, assim como o levantamento de características de funcionamento do magnetômetro.

1.2. O Tema

As formas de orientação de corpos rígidos no espaço têm sido cada dia mais tencionadas em diversas aplicações, entre elas o setor aeroespacial. Para determinados Cubesats, é de extrema importância o controle e determinação de sua atitude e órbita. Mesmo que nem sempre seja possível efetuar o controle de atitude e órbita em um Cubesat, as pesquisas avançam na busca de métodos cada vez mais eficazes para que a orientação desses satélites seja determinada com a maior precisão possível.

Para determinar a atitude de um satélite, podem ser usados diversos tipos de sensores. Os mais visados nesse projeto são magnetômetros, sensores capazes de obter diversos dados do Campo Geomagnético. Contudo, outros tipos de sensores podem ser

usados, como aqueles que baseiam-se em referências como fontes de radiação luminosa (como o Sol ou outras estrelas), gravidade, inércia, entre outros. Com mais de um sensor, a atitude pode ser determinada com boa ou até mesmo ótima precisão.

1.3. A Organização

O presente Relatório Final de Projeto de Iniciação Científica está organizado da seguinte maneira:

- **Capítulo 2, Método dos Mínimos Quadrados:** Esta seção se dedica ao aprofundamento do Método dos Mínimos Quadrados, técnica de otimização matemática muito útil quando se trata de determinação de atitude.
- **Capítulo 3, Determinação de Atitude:** Este capítulo se dedica ao principal foco do trabalho: a determinação de atitude de um Cubesat. Explora os diversos sensores possíveis para auxiliar na estimação da atitude de um Cubesat, as formas de representação da orientação do satélite e ainda uma pequena revisão sobre o Filtro de Kalman, uma técnica frequentemente usada na estimação de atitude.
- **Capítulo 4, Hipóteses Simplificadoras:** Para simulações e até mesmo determinações reais de atitude, é necessário calcular um valor inicial específico para que os dados sejam os mais corretos possíveis. Nesta seção, são abordadas as hipóteses simplificadoras para o cálculo do valor inicial.
- **Capítulo 5, Resultados Obtidos:** No capítulo 5 são demonstrados os resultados obtidos de Julho de 2008 a Junho de 2009. Está comentado o desenvolvimento do projeto, além de apresentar algumas simulações.
- **Capítulo 6, Conclusões e Perspectivas do Projeto:** Neste último capítulo, conclusões a respeito de todo o trabalho feito durante o ano de bolsa de iniciação científica são feitas, como também apresentada uma visão geral das pretensões para que os trabalhos futuros sejam realizados com o mesmo êxito deste.
- **Referências Bibliográficas:** Nesta seção, são citadas as fontes bibliográficas usadas como auxílio durante o Projeto de Proposta de Pesquisa.

Capítulo 2 - Método dos Mínimos Quadrados

O Método dos Mínimos Quadrados é uma técnica de otimização matemática que busca encontrar o melhor ajuste para um conjunto de dados, tentando minimizar a soma dos quadrados das diferenças entre a curva ajustada e os dados.

Quando a distribuição dos resíduos é Normal, as estimativas de máxima probabilidade podem ser encontradas pelo Método dos Mínimos Quadrados. Neste caso, as estimativas do MMQ para os coeficientes da equação são as estimativas lineares não-tendenciosas de mínima variância. Um programa de mínimos quadrados sempre começa com a minimização da soma:

$$S \equiv \sum_{i=1}^N (y_i^0 - y_i)$$

onde y_i^0 são valores observados de y , e y_i são valores calculados de y .

O uso do método consiste em minimizar os quadrados resíduos, como apresentado na Figura 2.1.

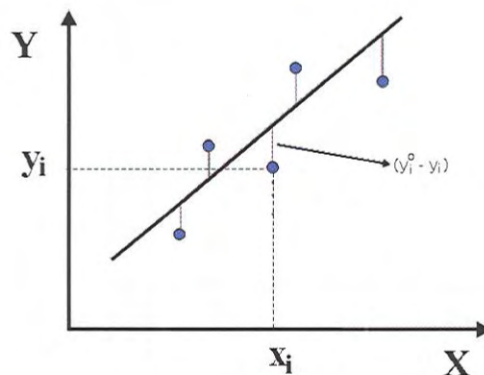


Figura 2.1 - Resíduos os quais são minimizados pelo método dos mínimos quadrados.
Fonte: <http://astro.if.ufrgs.br/minq/minq.htm>

O modelo mais simples a ser estimado é uma reta (equação 1), sendo b_0 o intercepto e b_1 a inclinação. A variável independente é X_i e a dependente, Y_i . O termo

de erro aleatório é e_i . Em função da consideração do termo de erro, podem ser aceitas várias combinações destes termos, e o quadrado dos resíduos também varia. No modelo linear de regressão simples indicado em (1), a mudança dos coeficientes (b_0, b_1) provoca novos valores para os erros (2). Os quadrados dos erros são, evidentemente, determinados em função destes coeficientes (3).

$$Y_i = b_0 + b_1 X_i + e_i \quad (1)$$

$$e_i = Y_i - b_0 - b_1 X_i \quad (2)$$

$$Q = f(b_0, b_1) = S(e_i)^2 = S(Y_i - b_0 - b_1 X_i)^2 \quad (3)$$

$$(i=1, 2, \dots, n)$$

Assim, para um determinado conjunto de dados, são inúmeros os conjuntos (b_0, b_1) que permitem ajustar equações razoáveis. Buscam-se os coeficientes que permitem obter o menor valor para a soma do quadrado dos resíduos. Para diferenciar dos outros, é chamado este par de coeficientes de (b_0, b_1) . Sabe-se que uma função atinge seus extremos (máximos ou mínimos) quando a derivada é nula. No caso, só há mínimo, pois a função Q é de valores positivos (quadrados dos erros). Os valores amostrais (X_i, Y_i) são constantes. Assim, derivando Q em relação à b_0 e b_1 (equações 4, 5) e fazendo estas derivadas parciais iguais a zero, é possível obter (b_0, b_1) . Os coeficientes (b_0, b_1) são os “Estimadores de Mínimos Quadrados” para os valores reais e desconhecidos (b_0, b_1) .

$$dQ/db_0 = -2 S[Y_i - b_0 - b_1 X_i] \quad (4)$$

$$dQ/db_1 = -2 S[(Y_i - b_0 - b_1 X_i) X_i] \quad (5)$$

Igualando a zero as derivadas parciais, no caso particular do mínimo da função Q , são obtidos (b_0, b_1) . Transformando os termos, como $Sb_0 = nb_0$ e $Sb_1 X_i = b_1 S X_i$, são obtidas as chamadas “Equações Normais” (6) e (7):

$$S Y_i = n b_0 + b_1 S X_i \quad (6)$$

$$S X_i Y_i = b_0 S X_i + b_1 S X_i^2 \quad (7)$$



E, por fim, obtém-se a inclinação e o intercepto em (8) e (9). O intercepto é calculado com os valores médios de X e Y.

$$b_1 = [n\sum X_i Y_i - \sum X_i \sum Y_i] / [n\sum X_i^2 - (\sum X_i)^2] \quad (8)$$

$$b_0 = (\sum Y_i - b_1 \sum X_i) / n \quad (9)$$

Capítulo 3 - Determinação de Atitude

3.1. Sensores de Atitude

A obtenção de dados sobre a atitude de um Cubesat é algo fundamental na maioria das missões espaciais. Sem esses dados, não é possível efetuar o controle do satélite e enviar os dados para a Terra. Geralmente, a informação dos sensores de atitude são combinadas com um algoritmo determinador de atitude, para obter dados com maior precisão.

Existem, basicamente, duas classes de sensores geralmente usadas em sistemas de determinação de atitude. São elas:

- Sensores Inerciais;
- Sensores Referenciais.

3.1.1. Sensores Inerciais

Os sensores inerciais medem a rotação e/ou a aceleração translacional relativa em uma estrutura inercial. Eles são montados diretamente na estrutura do satélite.

3.1.2. Sensores Referenciais

Um sensor de referência mede a direção de um vetor já conhecido.

Os principais tipos de sensores de referência são:

3.1.2.1. Sensor Solar

O Sol é um vetor de referência único. O sensor solar mede um ou dois ângulos entre sua base e a luz do Sol incidente. O tipo de sensor solar mais preciso é o SCC (*Solar Compass Chip*), que são chips sensíveis à luz fabricados com tecnologia MEMS (*Micro Electrical Mechanical Systems*). A precisão atingida usando um *Solar Compass Chip* chega a 0,1°.

É possível, da mesma forma, utilizar os painéis solares do Cubesat para observar a sua atitude em relação ao Sol. Como os painéis solares apresentam seu rendimento baseado no ângulo de incidência da luz solar, é possível utilizar esse ângulo para a determinação da atitude do satélite. Mesmo tendo em vista que o custo nesse caso é bem mais baixo em relação ao uso de um *Solar Compass Chip*, a precisão, geralmente, não chega a 1°.

Apesar de serem muito usados, devido ao baixo valor e certa precisão, é necessário um bom campo de visão para poderem ser utilizados. Como, geralmente, Cubesats permanecem em Órbitas Terrestres Baixas (*Low Earth Orbits – LEO*), e em órbitas baixas o satélite está sujeito a ficar em um período de eclipse, o sistema de determinação de atitude deve fornecer alguma forma de manusear as regulares perdas de referência do Sol.

3.1.2.2. Sensor Estelar

Considerado o tipo de sensor que oferece maior precisão na determinação de atitude de satélites, o sensor estelar mede as coordenadas de uma estrela, baseado em um banco de dados, que pode possuir milhares de estrelas catalogadas. No momento que é identificado um grupo de estrelas pelo sensor, é pesquisado no banco de dados, chamado Mapa Estelar, o conjunto de estrelas identificado pelo imageador. Então, com o vetor de referência conhecido, é possível determinar a atitude. O grau de precisão não é máximo apenas pelo motivo que, como existem inúmeras estrelas a mais que o Mapa Estelar tem capacidade de armazenar, pode haver grupos muito similares de estrelas. Portanto, não se pode ter 100% de certeza de que o grupo identificado é realmente o que consta no Mapa Estelar. A precisão de um sensor estelar pode chegar a 1 segundo de arco, o que é extremamente próximo à realidade.

3.1.2.3. Sensores de Horizonte

Sensores de Horizonte são dispositivos infravermelhos que detectam a diferença de temperatura entre a atmosfera da Terra e o Espaço exterior. Geralmente, a precisão para sistemas que usam sensores de horizonte são de 0.1 a 0.25 graus.

3.1.2.4. Campo Gravitacional

O campo gravitacional é produzido pela massa da Terra. Como a Terra tem formato geodésico, a gravidade não será exatamente constante sobre toda a superfície porque a distribuição de massa não é totalmente homogênea.

A gravidade fornece uma referência de grande interesse porque pode ser utilizada para indicar a inclinação de um objeto que se encontra sobre a superfície. Entretanto, é impossível obter medições diretas da gravidade. Só é possível medir a força de reação devido à gravidade. Dispositivos que medem a aceleração gravitacional nestas circunstâncias são chamados de acelerômetros.

Se um corpo não se encontra sob a ação de forças de reação, é impossível utilizar acelerômetros para medir a aceleração gravitacional. Um Cubesat, quando orbita a Terra, está permanentemente em queda livre. Sendo assim, não há forças de reação e a única aceleração que se lê é a aceleração devido ao arrasto aerodinâmico. Apesar de tudo, a gravidade é um vetor de referência importante.

3.1.2.5. Magnetômetros

Existem diversos tipos de magnetômetros. O magnetômetro fluxgate tem importante papel na detecção, medida e investigação do campo magnético da Terra. Prospecção mineral, testes não destrutivos de materiais, avaliação das interferências nos enlaces de radiocomunicação, controle de atitude de aeronaves, são alguns das suas atuais utilizações. Os magnetômetros de núcleo saturado ou "fluxgate magnetometer", são dispositivos que medem a magnitude e direção de campos magnéticos, estáticos ou alternados, e seu funcionamento baseia-se na propriedade de saturação de ligas magnéticas moles, que possibilitam o chaveamento do fluxo magnético, devido a variação da permeabilidade magnética da liga usada como núcleo. Dificuldades na aquisição deste dispositivo são encontradas pelos usuários devido à restrição imposta pelos países que detêm essa tecnologia, pelo seu potencial uso em aplicações militares. O domínio dessa tecnologia a disponibilizaria a todas essas aplicações [KABATA, 2000].

Magnetômetros são importantes para determinação de atitude em um Cubesat devido ao fato de que possuem pequenos tamanho, massa e valor. Um magnetômetro, porém, é insuficiente para determinar a atitude com boa precisão. Em regiões onde o Campo Geomagnético é menor e não muito conhecido, é extremamente difícil obter medidas significativas. Contudo, em Órbitas Terrestres Baixas (Low Earth Orbits), a atitude determinada possui determinada precisão. Alternativas são buscadas para determinar a atitude do Cubesat com maior eficiência, como analisar ao mesmo tempo dados de outro sensor, como por exemplo sensores solares (ou mesmo dados analisados da corrente de saída do painel solar do Cubesat).

A precisão da atitude determinada a partir de magnetômetro não é tão boa como sensores de estrelas ou sensores solares por uma combinação de fatores. Os principais são:

“

- *Perturbações no campo provocadas por sistemas eletrônicos do Cubesat,*
- *Erros de modelagem no modelo de referência do campo,*
- *Perturbações externas, como correntes ionosféricas.*

”

[BAK, 1999]

O campo magnético é um vetor. Portanto, é caracterizado por módulo, direção e sentido. No eletromagnetismo, usa-se \mathbf{B} para o campo de indução magnética ou fluxo de densidade. O campo é descrito pelas Equações de Maxwell:

Lei de Ampère

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \left(\mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \right) \quad (3.1)$$

Lei de Faraday

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (3.2)$$

Lei de Gauss

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \rho \quad (3.3)$$

Condição solenoidal (Lei de Gauss para o campo magnético)

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (3.4)$$

onde μ_0 é a permeabilidade magnética no vácuo, $\partial \mathbf{D} / \partial t$ é a corrente de deslocamento, \mathbf{E} é o campo elétrico e ρ é a densidade de carga elétrica. Desprezando as correntes entre a superfície da Terra e a ionosfera, e as variações do campo externo, $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$ e o campo deriva de um potencial escalar. \mathbf{B} pode ser representado como gradiente de um potencial escalar V .

$$\mathbf{B} = -\nabla V \quad (3.5)$$

Assim, pela condição solenoidal, o divergente de \mathbf{B} é nulo e V satisfaz a equação de Laplace:

$$\nabla^2 V = 0 \quad (3.6)$$

Então, pode-se dizer que:

$$\mathbf{B}(\mathbf{r},t) = \mathbf{B}_m(\mathbf{r},t) + \mathbf{B}_c(\mathbf{r},t) + \mathbf{B}_d(\mathbf{r},t) \quad (3.7)$$

Onde:

- O campo principal, \mathbf{B}_m , é formado pela circulação do fluido no núcleo da Terra ;
- O campo crustal, \mathbf{B}_c , que é o campo presente nas aglomerações rochosas da superfície da Terra;
- O campo de perturbação, \mathbf{B}_d , que é um combinado de correntes elétricas da alta atmosfera e da magnetosfera.

As representações de \mathbf{B} satisfazem as equações (3.5) e (3.6). Em 1839, Gauss mostrou que V pode ser escrito como uma série em função dos harmônicos esféricos.

Em termos de coordenadas esféricas (θ = colatitude, λ = longitude, r = raio), a equação (3.6) pode ser escrita dessa forma:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial V}{\partial r} \right) + \frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial V}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{\sin^2 \theta} \frac{\partial^2 V}{\partial \lambda^2} = 0 \quad (3.8)$$

A solução da equação (3.8) é encontrada pelo método da separação de variáveis,

$$V = R(r)\Theta(\theta)\Lambda(\lambda) \quad (3.9)$$

Substituindo os termos das equações diferenciais da equação (3.8):

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial r} &= \Theta \Lambda \frac{dR}{dr} \\ \frac{\partial V}{\partial \theta} &= R \Lambda \frac{d\Theta}{d\theta} \\ \frac{\partial^2 V}{\partial \lambda^2} &= R \Theta \frac{d^2 \Lambda}{d\lambda^2} \end{aligned} \quad (3.10)$$

Fazendo a substituição e dividindo os termos por $R\Theta\Lambda$ e multiplicando por $\sin^2\theta$:

$$\frac{\sin^2 \theta}{R} \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{dR}{dr} \right) + \frac{\sin \theta}{\Theta} \frac{d}{d\theta} \left(\sin \theta \frac{d\Theta}{d\theta} \right) + \frac{1}{\Lambda} \frac{d^2 \Lambda}{d\lambda^2} \quad (3.11)$$

passando o último termo para o 2º membro:

$$\frac{\sin^2 \theta}{R} \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{dR}{dr} \right) + \frac{\sin \theta}{\Theta} \frac{d}{d\theta} \left(\sin \theta \frac{d\Theta}{d\theta} \right) = - \frac{1}{\Lambda} \frac{d^2 \Lambda}{d\lambda^2} \quad (3.12)$$

o que só é possível se ambos os membros forem iguais a uma constante:

$$\frac{1}{\Lambda} \frac{d^2 \Lambda}{d\lambda^2} = -m^2 \quad (3.13)$$

tomando o primeiro membro e dividindo por $\sin^2\theta$ e passando o 2º termo para o 2º membro:

$$\begin{aligned} \frac{1}{R} \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{dR}{dr} \right) &= \frac{m^2}{\sin^2 \theta} - \frac{1}{\sin \theta} \frac{1}{\theta} \frac{d}{d\theta} \left(\sin \theta \frac{d\theta}{d\theta} \right) \\ &= n(n+1) \frac{1}{\sin \theta} \frac{d}{d\theta} \left(\sin \theta \frac{d\theta}{d\theta} \right) + \left[n(n+1) - \frac{m^2}{\sin^2 \theta} \right] \theta = 0 \end{aligned} \quad (3.14)$$

$$\frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{dR}{dr} \right) - n(n+1)R = 0 \quad (3.15)$$

A constante de separação foi escrita na forma $n(n+1)$ porque isto será conveniente em seguida. Neste estágio, n é completamente arbitrário. Para encontrar a função do potencial, deve-se resolver as equações (3.13), (3.14) e (3.15). Assim, as soluções para a equação (3.13) são:

$$\Lambda = A \cos m\lambda \quad \text{ou} \quad \Lambda = B \sin m\lambda \quad (3.16)$$

onde A e B são constantes de integração e m é um número inteiro para que as funções sejam unívocas. A equação (3.15) admite soluções do tipo:

$$R = Cr^n \quad \text{ou} \quad R = Dr^{-(n+1)} \quad (3.17)$$

onde C e D são constantes e n é um número inteiro.

Para solução da equação (3.14) é conveniente fazer uma mudança de variável.

Colocando $\mu = \cos \theta$ e $d\theta = -\frac{d\mu}{\sqrt{1-\mu^2}}$, temos que

$$\frac{d}{d\mu} \left[(1-\mu^2)^n \frac{dP}{d\mu} \right] + \left[n(n+1) + \frac{m^2}{\sin^2 \theta} \right] P = 0 \quad (3.18)$$

As soluções desta equação podem ser encontradas expressando n P como uma série infinita de potências de μ . Nos problemas físicos, a condição da série ser convergente impõe um limite superior nas potências permitidas para μ , de modo que a série se reduzirá a um polinômio de grau n , onde n é um inteiro positivo. Estes polinômios contêm somente potências pares de n , se n for par. Por outro lado, se n for ímpar, (μ) n P conterá somente potências ímpares de μ . Fazendo $m = 0$, a equação (chamada de equação de Legendre) passa a ter soluções que são os polinômios de Legendre:

$$P_n^0(\mu) = \frac{1}{2^n n!} \frac{d^n}{d\mu^n} [(\mu^2 - 1)^n] \quad (3.19)$$

onde

onde $\frac{1}{2^n n!}$ é o fator de normalização dos polinômios

Quando $m \neq 0$, há variação com a longitude e a equação chama-se Equação de Legendre Associada e as soluções são os polinômios de Legendre Associados, que se relacionam com os polinômios de Legendre através de:

$$P_n^m(\theta) = \sin^m \theta \frac{d^m P_n^0(\mu)}{d(\mu)^m} \quad (3.20)$$

Neste caso, a derivada será nula quando $(m + n) > 2n$, portanto, devemos ter $m \leq n$. Para o caso particular de $m = n$, os harmônicos correspondentes chamam-se harmônicos setoriais. No caso geral de $m \neq n$, com $m \neq 0$, as soluções são os harmônicos tesserais.

As soluções da parte radial R do tipo $r^{-(n+1)}$, correspondem a fontes na origem. Para soluções do tipo r^n correspondentes a fontes no infinito, com $V \rightarrow \infty$ para $r \rightarrow \infty$, portanto, fontes de origem externa à Terra. A solução geral da Equação de Laplace sobre uma esfera é:

$$V = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n [C_n^m r^n + D_n^m r^{-(n+1)}] [A_n^m \cos m\lambda + B_n^m \sin m\lambda] P_n^m(\theta) \quad (3.21)$$

onde A_n^m , B_n^m , C_n^m e D_n^m são os coeficientes dos harmônicos esféricos.

Combinando as constantes e introduzindo a razão $\left(\frac{a}{r}\right)$, onde a é o raio médio da Terra, e se c e s forem as frações de $P_n^m \cos m\lambda$ e $P_n^m \sin m\lambda$, devidas a origem externa, a solução geral será:

$$V = a \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n P_n^m(\theta) \left\{ \left[c_n^m \left(\frac{r}{a}\right)^n + (1 - c_n^m) \left(\frac{a}{r}\right)^{n+1} \right] A_n^m \cos m\lambda + \left[s_n^m \left(\frac{r}{a}\right)^n + (1 - s_n^m) \left(\frac{a}{r}\right)^{n+1} \right] B_n^m \sin m\lambda \right\} \quad (3.22)$$

o multiplicador a é adicionado a solução para que os coeficientes tenham a mesma dimensão de B . O potencial V não é diretamente observável, mas sim as componentes do campo medidas na superfície da Terra ($r = a$). As componentes do campo geomagnético são derivadas direcionais do potencial e dependem dos coeficientes A_n^m e B_n^m . Utilizando a equação (3.5), pode-se encontrar as componentes:

$$X = \frac{-\partial V}{r \partial \theta} = - \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n \{ A_n^m \cos m\lambda + B_n^m \sin m\lambda \} \frac{dP_n^m(\theta)}{d\theta} \quad (3.23)$$

$$Y = \frac{-1}{r \sin \theta} \frac{\partial V}{\partial \lambda} = \frac{1}{\sin \theta} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n \{ m A_n^m \sin m\lambda + B_n^m \cos m\lambda \} P_n^m(\theta) \quad (3.24)$$

$$Z = \frac{-\partial V}{\partial r} = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n \{ [n c_n^m - (1 - c_n^m)(n + 1)] A_n^m \cos m\lambda + [n s_n^m - (1 - s_n^m)(n + 1)] B_n^m \sin m\lambda \} P_n^m(\theta) \quad (3.25)$$

Ajustando-se as expressões de X e Y aos valores observados, obtém-se os coeficientes A_n^m e B_n^m . Numa primeira aproximação, pode-se desprezar o campo externo, supondo que c_n^m e s_n^m são muito menores que 1. Então a expressão do potencial fica:

$$V = a \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n P_n^m(\theta) [g_n^m \cos m\lambda + h_n^m \sin m\lambda] \left(\frac{a}{r}\right)^{n+1} \quad (3.26)$$

[WERTZ, 1978]

onde g_n^m e h_n^m são os chamados Coeficientes de Gauss e têm dimensões de campo magnético.

Sobre a superfície da Terra ($r = a$), as componentes X, Y e Z do campo geomagnético podem ser escritas em termos dos coeficientes de Gauss, como:

$$X = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^m \{g_n^m \cos m\lambda + h_n^m \sin m\lambda\} \frac{dP_n^m(\theta)}{d\theta} \quad (3.27)$$

$$Y = \frac{1}{\sin \theta} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^m \{m g_n^m \sin m\lambda + h_n^m \cos m\lambda\} P_n^m(\theta) \quad (3.28)$$

$$Z = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^m \{[n c_n^m - (1 - c_n^m)(n + 1)] g_n^m \cos m\lambda + [n s_n^m - (1 - s_n^m)(n + 1)] h_n^m \sin m\lambda\} P_n^m(\theta) \quad (3.29)$$

[GRANZIERA, 2006]

O cálculo dos g_n^m e h_n^m é feito a partir de medidas realizadas em observatórios e de levantamentos magnéticos todas reduzidas a mesma época. Então, para um θ fixo, desenvolve-se em série de Fourier ao longo do paralelo:

$$f(\theta) = \sum_{m=0}^{\infty} (a_m \cos m\lambda + b_m \sin m\lambda) \quad (3.30)$$

Nesta série, os valores de $f(\theta)$ são conhecidos para os nós da rede, obtendo-se então os a_m e b_m . Igualando-se a série (3.30) a (3.27), encontram-se os Coeficientes de Gauss. [GRANZIERA, 2006]

3.2. Representação de Atitude

Existem diversas formas de representar a orientação. As principais delas são na forma de Ângulos de Euler e de Quatérnions. Ambas as representações convergem para uma matriz de atitude que faz a rotação de um sistema de coordenadas para outro, ou seja, realiza a rotação do sistema de coordenadas de referência para o sistema de coordenadas de observação. Para cada aplicação, uma dessas formas é mais adequada.

3.2.1. Ângulos de Euler

Segundo o teorema, é possível concluir que uma matriz de atitude pode ser decomposta em três rotações, ou seja, a atitude por ser uma matriz de rotação, pode ser representada por uma seqüência dos ângulos de Euler. Os Ângulos de Euler são mais usados para atitude e navegação no sistema de coordenadas horizontal local. Em aplicações de satélites eles são também bastante utilizados para representar a atitude em relação ao sistema orbital.

3.2.2. Quatérnion

O quatérnion é uma entidade matemática de 4 elementos. Ele pode operar uma rotação da mesma forma que uma matriz de rotação. Portanto, o quatérnion também pode representar a atitude.

O quatérnion é uma quantia híbrida feita da soma de um escalar a um vetor. Portanto,



$$q = q_0 + q_1\mathbf{i} + q_2\mathbf{j} + q_3\mathbf{k} = q_0 + \mathbf{q}$$

onde q_0 é a parte escalar e \mathbf{q} a parte vetorial. Os vetores \mathbf{i} , \mathbf{j} e \mathbf{k} são unitários e ortogonais formando uma base canônica.

Os quatérnions definidos acima precisam ter suas operações básicas definidas, ou seja, é provado que quatérnions podem ser iguados, somados, subtraídos e multiplicados.

3.3. Filtro de Kalman

Uma técnica frequentemente usada na estimação da atitude é o Filtro de Kalman. Ele utiliza um modelo interno do sistema combinado com um modelo estatístico do erro associado com o modelo interno e as medidas. O filtro de Kalman minimiza o erro de covariância entre o estado estimado e o estado real. As medidas são processadas sequencialmente e retidas com as informações de medidas passadas.

O filtro de Kalman é de várias formas útil para estimação de atitude, usando uma combinação de vetores de referência e medidas de um gyro. [BAK, 1999]

Capítulo 4 - Hipóteses Simplificadoras

Para simulações e até mesmo determinações reais de atitude, precisamos de um chute um valor inicial específico, para que os dados sejam os mais corretos possíveis. Tendo em vista o método utilizado, as hipóteses simplificadoras utilizadas são:

- Órbita Kepleriana, circular;
- Terra Esférica;
- Campo Geomagnético: Dipolo
- Satélite perfeitamente estabilizado inercialmente, sem nutação.

Após determinar quais são as Hipóteses Simplificadoras, é estabelecida uma Nomenclatura, são feitos a Modelagem (Modelo da Órbita, Modelo do Campo Geomagnético e Modelo da Condição de Sombra) e o Equacionamento (Processamento das medidas do magnetômetro e Processamento das medidas do sensor solar) e, por fim, chega-se a uma Solução, que será usada como Chute Inicial.

4.1. Órbita Kepleriana, Circular

Johannes Kepler formulou suas leis ao analisar massa de dados acerca da posição das planetas. Na forma moderna, suas leis podem ser descritas como:

- Todos os planetas descrevem órbitas elípticas, estando o Sol num dos focos;
- O vetor posição de um planeta, com origem no Sol, varre áreas iguais em tempos iguais;
- A razão entre o quadrado do período de revolução pelo cubo do semi-eixo maior da órbita de um planeta é a mesma para todos os planetas que orbitam em torno do Sol.

Estas mesmas leis podem ser aplicadas se a Terra for substituída por satélite e o Sol for substituído pela Terra.

Capítulo 5 - Resultados Obtidos

No período de Julho de 2008 a Junho de 2009, foram realizadas várias atividades relacionadas ao aprendizado da navegação de órbita de Cubesats através de magnetômetros, focando-se na determinação de atitude de Cubesats através de magnetômetros.

Diversos livros, artigos, dissertações e teses foram estudados, sendo estas referências bibliográficas de muita utilidade na compreensão do assunto abordado pelo Projeto de Pesquisa.

Semanalmente, houve a interação via email entre o Bolsista e o Dr. Roberto Vieira da Fonseca Lopes, orientador do Projeto de Pesquisa. Interações diárias com o Dr. Nelson Jorge Schuch auxiliaram a continuidade do projeto. Diversos alunos bolsistas do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRS/INPE – MCT foram de grande valia, sanando dúvidas imediatas que eram inevitáveis para o andamento do projeto.

No período de 26 de janeiro de 2009 a 30 de janeiro de 2009, foi feita uma viagem à sede do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE – MCT, tendo o Bolsista nessa semana uma grande interação com seu orientador, Dr. Roberto Vieira da Fonseca Lopes, com seu co-orientador, Dr. Nalin Babulal Trivedi, e também com os doutores Ijar Milagre da Fonseca, Valcir Orlando, Odim Mendes Junior e Otávio Durão.

Durante o período de estudo, o Bolsista teve uma familiarização com o programa Matlab, essencial para simulações ligadas ao Projeto de Pesquisa. Outro programa de extremo interesse o qual o Bolsista obteve familiarização foi o STK 8, software capaz de fazer diversas simulações de órbita.

De 08 a 11 de setembro de 2008, o Bolsista participou do II Simpósio Brasileiro de Geofísica Espacial e Aeronomia, em Campina Grande, PB. O trabalho apresentado em pôster foi intitulado: “**Conceitos de Navegação de Bordo de Cubesats através de Magnetômetros**”. O resumo do trabalho apresentado foi publicado nos Anais do II Simpósio Brasileiro de Geofísica e Aeronomia. O resumo está na seção “Anexos”.

De 03 a 06 de novembro de 2008, o Bolsista participou como co-autor do trabalho “**Variação com o ciclo solar das pulsações geomagnéticas de períodos longos (1,0 - 10 mHz) na região da anomalia magnética do atlântico sul – AMAS –**

SICINPE” na 23ª Jornada Acadêmica Integrada, na UFSM. O resumo do trabalho apresentado foi publicado nos Anais da 23ª Jornada Acadêmica Integrada – UFSM. O resumo está na seção “Anexos”.

No dia 15 de maio de 2009, o resumo do trabalho intitulado “**Comparison between two different ways of Attitude Determination in the NANOSATC-BR Cubesat**” foi formalmente aceito pelo comitê da IAGA2009, que será realizada entre 23 e 30 de agosto de 2009, na cidade de Sopron, Hungria. O resumo está na seção “Anexos”.

SIMULAÇÕES

Simulação 1 - As simulações a seguir foram feitas através do algoritmo *magshape*, da rotina *campotese*, enviada ao Bolsista pelo Dr. Roberto Vieira da Fonseca Lopes. Ela mostra a forma do campo geomagnético, evidenciando suas isocurvas, num modelo dipolo. Quando a rotina é acessada, um valor entre 310mG e 600mG é requisitado. As simulações foram feitas com valores estipulados de 311mG (Figura 5.1) e 450mG (Figura 5.2). O algoritmo usado está na seção “Anexos”.

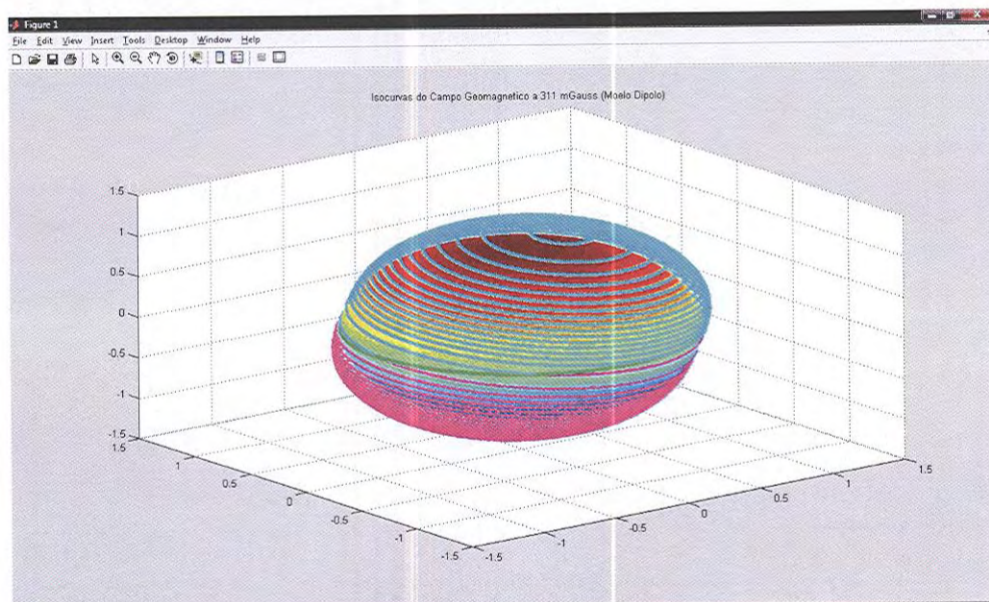


Figura 5.1 - Isocurvas do Campo Geomagnético a 311 mGauss (Modelo Dipolo).

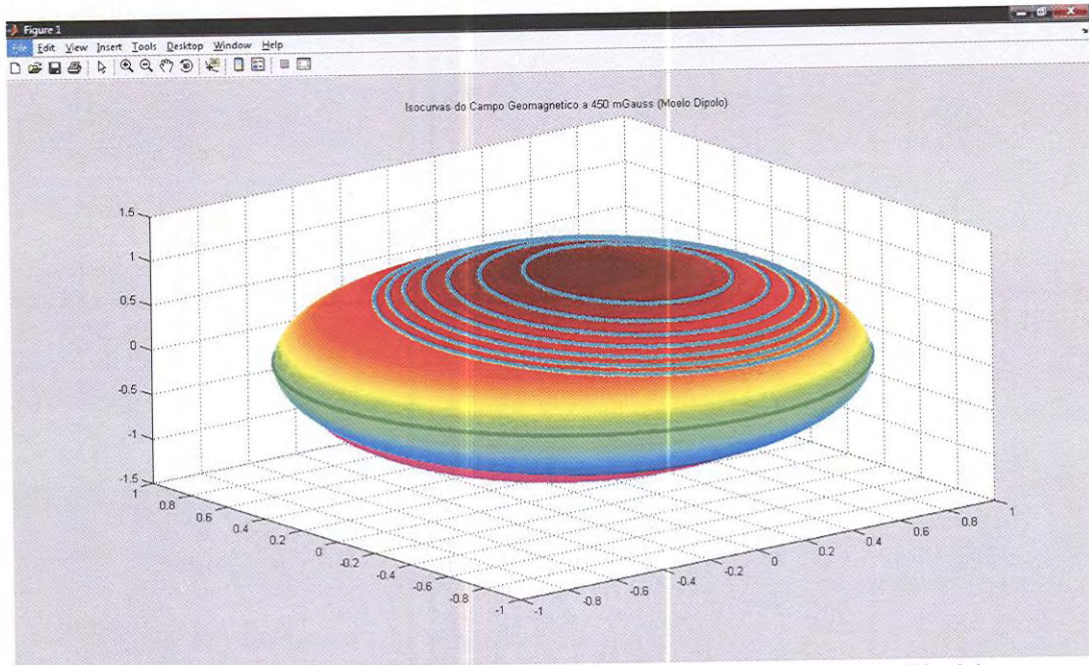


Figura 5.2 - Isocurvas do Campo Geomagnético a 450 mGauss (Modelo Dipolo).

Simulação 2 – A simulação aqui apresentada foi feita no software STK 8. Esse software é muito versátil. Entre outras funções interessantes, permite simular órbita de satélites. Como a órbita do NANOSATC-BR será polar, foi escolhida para a simulação uma órbita circular, e ajustada sua inclinação para 98° , de modo a buscar a máxima semelhança com uma órbita polar. A altitude escolhida foi 650 km, ou seja, uma Órbita Terrestre Baixa (Low Earth Orbit – LEO). (Figura 5.3)

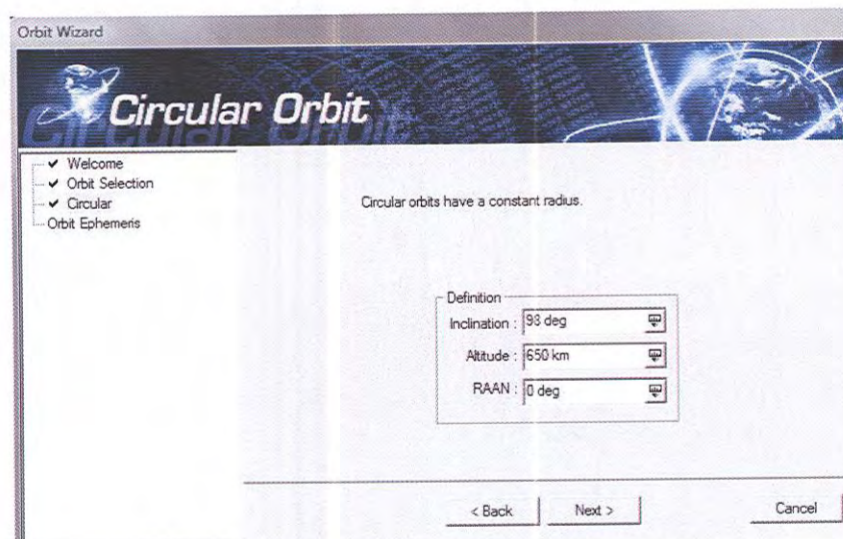


Figura 5.3 - Seleção da inclinação e altitude da órbita.

Devido a limitações de versão do programa, o período escolhido foi de um dia, entre 1 Julho de 2007, às 12:00h, até o dia 2 de Julho de 2007, às 12:00h. (Figura 5.4)

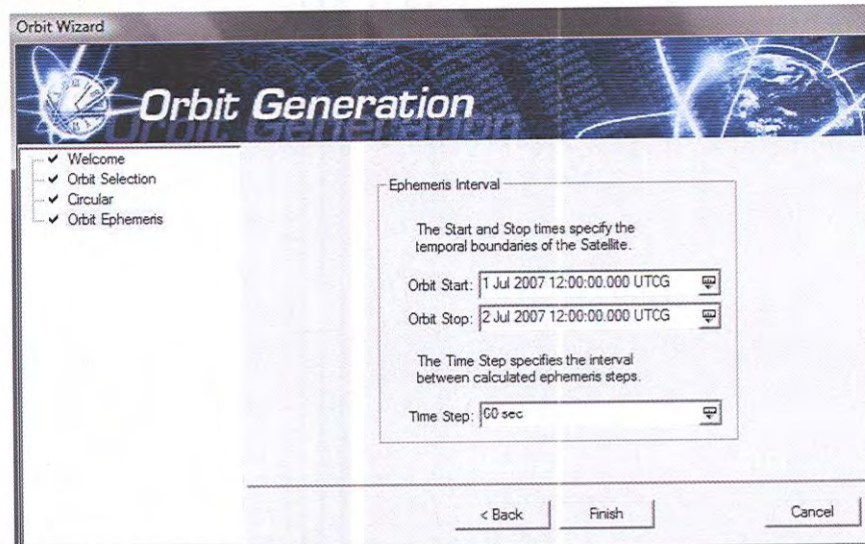


Figura 5.4 - Seleção do período utilizado na simulação de órbita do satélite.

Foi constatado através da simulação, que com os dados pré-estabelecidos, o satélite passaria duas vezes em um dia pela Anomalia Magnética do Atlântico Sul – AMAS, local que seria de extrema importância, visto que um dos objetivos do NANOSATC-BR é justamente estudar essa anomalia.

A primeira passagem pelo Brasil se realizaria por volta das 21:01h do dia 1 Julho de 2007, no sentido norte-sul. (Figura 5.5)

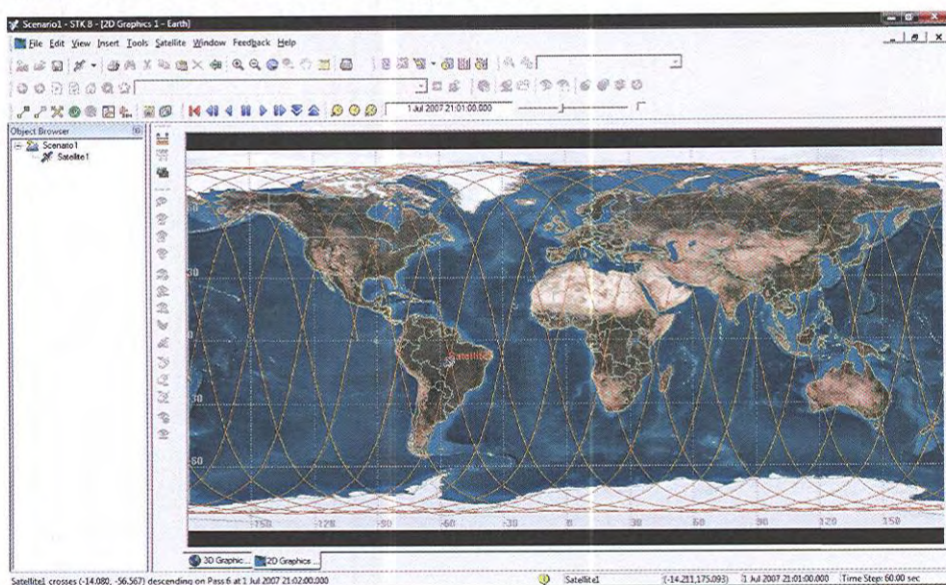


Figura 5.5 - Primeira passagem pelo Brasil, às 21:01h do dia 01 de Julho de 2007.

A segunda passagem pelo Brasil se realizaria por volta das 09:04:10h do dia 02 de Julho de 2007, no sentido sul-norte. (Figura 5.6)

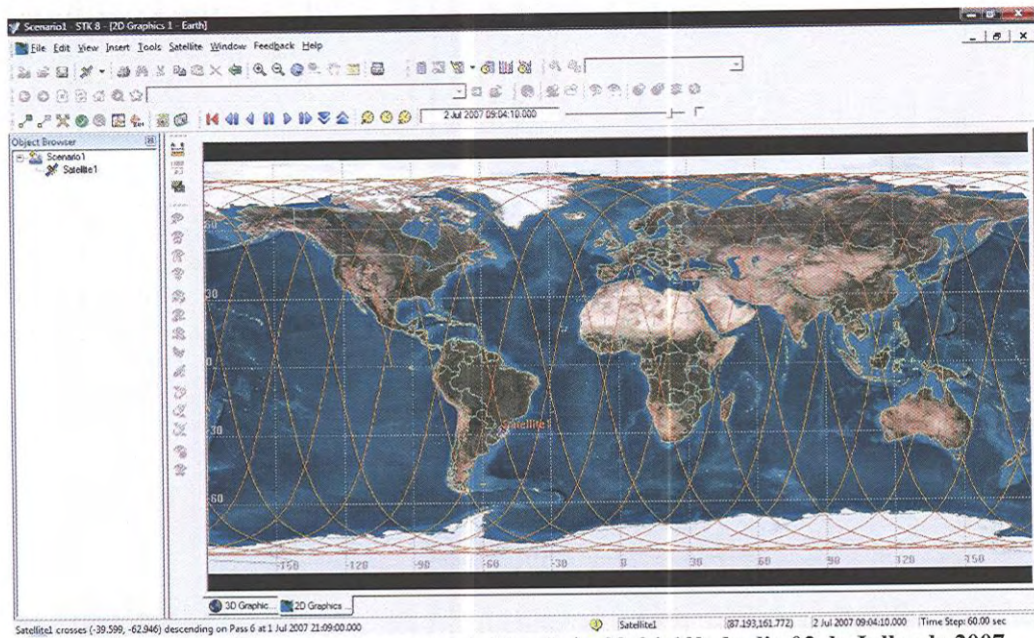


Figura 5.6 - Segunda passagem pelo Brasil, às 09:04:10h do dia 02 de Julho de 2007.

Capítulo 6 – Conclusões e Perspectivas do Projeto

No Relatório, foram exploradas as formas de navegação de bordo de um Cubesat através de magnetômetros. Através do estudo das referências bibliográficas, somando-se ao auxílio de meu orientador, Dr. Roberto Vieira da Fonseca Lopes, e de meus co-orientadores, Dr. Nelson Jorge Schuch e Dr. Nalin Babulal Trivedi, foram aprofundados conceitos importantes relativos à determinação e controle de órbita e atitude de Cubesats.

Tratando-se de um Cubesat, satélite de 10 centímetros de aresta e 1 quilograma de massa, e levando em conta que não haverá gastos excessivos, é inviável possuir um subsistema de controle de atitude. Da mesma forma, não é possível controlar a órbita dele. Conforme estudado, apenas é possível um controle de órbita passivo. O foguete lançador do Cubesat o lança de determinada maneira anteriormente prevista, a fim de fazê-lo entrar na órbita esperada.

Foram estudadas maneiras de se determinar a órbita e a atitude através de magnetômetros. O NANOSATC-BR possuirá um magnetômetro a fim de medir a componente do Campo Magnético Terrestre ao longo de seu eixo sensível. Devido a este fato, com o uso de somente um magnetômetro, a informação sobre a atitude é bastante limitada. Como alternativa, é possível adicionar aos dados obtidos com o magnetômetro dados da corrente de saída do painel solar ou mesmo estudar a possibilidade de possuir um sensor solar específico para esta função. No primeiro caso, através da corrente de saída do painel solar é possível determinar o ângulo entre o raio de Sol e o painel, tendo assim o Sol como vetor de referência. Contudo, a precisão dos dados da atitude do Cubesat permanece baixa. No segundo caso, com um sensor solar específico para a função de determinação de atitude, a precisão melhoraria de maneira considerável.

Com o desenvolvimento do Projeto, foi possível ampliar meus conhecimentos nas áreas de Geofísica, Cálculo Numérico, Eletrônica e Navegação de Bordo de Satélites. Foi de grande importância o aprendizado em todas essas áreas, tanto para a continuidade do projeto como para meu desenvolvimento pessoal.



Tendo em vista as etapas concluídas, as perspectivas futuras são aprofundar meus conhecimentos nas áreas estudadas, buscando maneiras eficientes de navegação de bordo de um Cubesat.

Referências Bibliográficas

- [1] Bak, T.. **Spacecraft Attitude Determination – A Magnetometer Approach.** Department of Control Engineering. Aalborg University, 1999.
- [2] Granziera, F.. **Simulação e Implementação de um Determinador de Atitude em Tempo Real utilizando Sensores Microfabricados.** Universidade Estadual de Londrina, 2006.
- [3] Santos, D.A.. **Estimação de Atitude e Velocidade Angular de Satélites utilizando medidas do Campo Geomagnético e da Direção do Sol.** ITA, São José dos Campos, 2008.
- [4] Souza, P.N.. **Subsistema de Controle de Atitude.** Coordenação Geral de Engenharia e Tecnologia Espacial, INPE. São José dos Campos, 2008.
- [5] Hartmann, G.A. **A Anomalia Magnética do Atlântico Sul: Causas e Efeitos.** Universidade de São Paulo, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas. São Paulo, 2005.
- [6] Lopes, R.V.F., Kuga, H. K., Silva, A.R. **Coarse Orbit Determination as a Dividend from Attitude Sensors For Spin-Stabilized Satellites.** *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences*, Foz do Iguaçu, Brasil. Vol XXI, fev., 1999, special Issue, pp.346-355.
- [7] Wertz, J.R.. **Spacecraft Attitude Determination and Control.** London: D. Reidel Astrophysics and Space Science Library, v. 73, 1978.
- [8] Thompson, R. H.; Neal, G. F. and Shuster, M. D. **Magnetometer and Spin-Axis Attitude Estimation for the AMPTE Mission.** *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, Jul-Aug., 1984, pp. 505-507.



- [9] Deutschmann, J.; Harman, R. and Bar-Itzhack, I. **A Low Cost Approach to Simultaneous Orbit, Attitude, and Rate Estimation Using an Extended Kalman Filter (AAS 98-355)**. *Advances in the Astronautical Sciences*, Vol. 100, Part II, pp.717-726, 1998.
- [10] Lopes, R.V.F.; Orlando, V.; et ali. **Attitude Determination of the Brazilian Satellite SCD-1**. *Revista Brasileira de Ciências Mecânicas*. Brasil: v. xvi, Special Issue, p.11-18, 1994.
- [11] Kabata, W. . **Magnetômetro Fluxgate para Satélites Científicos**. ITA, 2000.



ANEXOS



Anexo A

Algoritmo usado na SIMULAÇÃO 1, relativo às Isocurvas do Campo Geomagnético





```
% forma do campo geomagnetico
clear
a      = 6371.2;                % Raio equatorial
da Terra.
g1     = -2006;                % Constante de
Gauss: valor no eixo das abscissas (X).
h1     = 5704;                % Constante de
Gauss: valor no eixo das ordenadas (Y).
g0     = -30109;              % Constante de
Gauss: valor no eixo das quotas (Z).
intdip = sqrt(g1^2 + h1^2 + g0^2);
teta   = acos(g0/intdip);
fi     = pi - asin(h1/(intdip*sin(teta)));
jdo    = JDN(2000,1,1,12,0,0);
tu     = (jdo-2415020)/365.25; % tempo univer-
sal.
ag0    = 99.6909833+3600.7689*tu+0.00038708*(tu^2); % alfa g zero.
jd     = JDN(2004,5,27,15,0,0);
dt     = jd - jdo;
am     = (ag0+dt*360.9856469)*pi/180+fi;
M      = [sin(teta)*cos(am);sin(teta)*sin(am);cos(teta)];
bref   = input('Intensidade em mili Gauss (maior que 310 e menor que
600): ');

u      = [-1:.005:1];
[X,Y]  = meshgrid(u,u);
R      = sqrt(X.*X + Y.*Y);
outer  = find(R>=1);
X(outer) = NaN;
Y(outer) = NaN;
R(outer) = NaN;
Q      = sqrt(2-R.*R);
X      = Q .* X;
Y      = Q .* Y;
Z      = 1 - R.*R;
X      = [X,fliplr(X)];
Y      = [Y,fliplr(Y)];
Z      = [Z,-fliplr(Z)];
figure(1)
surf(X,Y,Z)
shading interp
hold on
plot(sin([0:.1:360]*pi/180),cos([0:.1:360]*pi/180),'g.')
hold off
title(['Isocurvas do Campo Geomagnetico a ',num2str(bref),' mGauss
(Moelo Dipolo)'])
disp('Esfera homogenea terminada'),pause(.1)

k      = 0;
konv   = 0;
while ~konv;
    k      = k + 1;
    hsat   = 100 * (k-1);
    r      = 1 + hsat/a;
    MescR  = M(1)*X + M(2)*Y + M(3)*Z;
    b      = intdip/r^3 * sqrt(3*MescR.*MescR+1) / 100;
    Lat    = asin(Z);
    Lon    = atan2(X,Y);
```



```
figure(2)
[c,h] = contour(X,Y,b.*sign(Z),[bref,-bref]);
close
if isempty(h)
    konv=1;
else
    Xp = [];
    Yp = [];
    Xn = [];
    Yn = [];
    tpos = 0;
    tneg = 0;
    ic = 1;
    while ic<size(c,2)
        npt = c(2,ic);
        nsg = sign(c(1,ic));
        if nsg>0
            for i=1:npt
                tpos = tpos + 1;
                Xp(tpos) = c(1,ic+i);
                Yp(tpos) = c(2,ic+i);
            end
        else
            for i=1:npt
                tneg = tneg + 1;
                Xn(tneg) = c(1,ic+i);
                Yn(tneg) = c(2,ic+i);
            end
        end
        ic = ic + npt + 1;
    end
    Zp = sqrt(1-Xp.*Xp-Yp.*Yp);
    Zn = -sqrt(1-Xn.*Xn-Yn.*Yn);
    figure(1)
    hold on
    plot3(r*Xp,r*Yp,r*Zp,'c.',r*Xn,r*Yn,r*Zn,'m.')
    hold off
    pause(.1)
end
end
disp(['Terminei. A altitide maxima atingida foi ',num2str(hsat),'
km'])
```




Anexo B

Títulos e resumos de trabalhos apresentados e/ou submetidos



Títulos dos trabalhos apresentados e submetidos

01 - **Savian, F. S.**; Schuch, N. J.; Lopes, R. V. F.; Trivedi, N. B.; Antunes, C. E.; Siqueira, J.; Rigon, W. S. . **Conceitos de Navegação de Bordo de Cubesats através de Magnetômetros**. In: II Simpósio Brasileiro de Geofísica Espacial e Aeronomia – II SBGEA, Campina Grande, Paraíba, 2008. Anais do II Simpósio Brasileiro de Geofísica Espacial e Aeronomia.

02 - **Savian, F. S.**; Schuch, N. J.; Lopes, R. V. F.; Trivedi, N. B. . **Utilização de Magnetômetro para Navegação de Bordo em um Cubesat**. In: Seminário de Iniciação Científica do INPE 2009 – SICINPE 2009.

03 - **Savian, F. S.**; Lopes, R. V. F.; Schuch, N. J.; Durão, O. S. C.; Antunes, C. E.; Siqueira, J. . **Comparison between two different ways of attitude determination in the NANOSATC-BR Cubesat**. In. IAGA 2009, Sopron, Hungria, 2009.

04 - Rigon, W. S.; Dutra, S. L. G.; Schuch, N. J.; Trivedi, N. B.; Siqueira, J.; Antunes, C. E.; **Savian, F. S.** . **Variação com o ciclo solar das pulsações geomagnéticas de períodos longos (1,0 - 10 mHz) na região da Anomalia Magnética do Atlântico Sul - AMAS - SICINPE 2008**. In: 23ª Jornada Acadêmica Integrada, 2008, Santa Maria. Anais da 23ª Jornada Acadêmica Integrada, 2008.



**II Simpósio Brasileiro de Geofísica Espacial e Aeronomia – II SBGEA, Campina Grande,
2008**

**CONCEITOS DE NAVEGAÇÃO DE BORDO DE CUBESATS
ATRAVÉS DE MAGNETÔMETROS**

Savian, F. S. [1]; Schuch, N. J. [1]; Lopes, R. V. F. [2]; Trivedi, N. B. [3];
Antunes, C. E. [1]; Siqueira, J. [1]; Rigon, W. S. [1]

[1] Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRS/CIE/INPE – MCT em parceria com o
Laboratório de Ciências Espaciais de Santa Maria – LACESM/CT – UFSM,
Av. Roraima, Campus UFSM, CP 5021, CEP 97110-970, Santa Maria, RS, Brasil;

[2] Divisão de Sistemas Espaciais - DSE/ETE/INPE - MCT, São José dos Campos, SP, Brasil;

[3] Divisão de Geofísica Espacial - DGE/CEA/INPE - MCT, São José dos Campos, SP, Brasil.

RESUMO

A navegação de um satélite envolve a determinação e o controle da sua órbita e de sua atitude. A utilização de um magnetômetro em um cubesat para a função de navegação é muito interessante, tendo em vista que é um equipamento com baixa massa e de pequeno porte, e que, portanto, atende às limitações de tamanho e peso impostas para esta aplicação. Num magnetômetro de 3 eixos, os eixos x e y, por exemplo, podem ser o plano de rotação do satélite, imprimindo e corrigindo a velocidade de rotação. O eixo z pode fazer o papel de eixo de rotação, orientado na direção do Sol e efetuando o controle de precessão. O tipo de magnetômetro mais usado para esse fim é o fluxgate, que tem o seu funcionamento baseado na variação de permeabilidade magnética em uma bobina primária e na detecção da variação de fluxo do campo magnético externo por uma bobina secundária. O objetivo deste trabalho é descrever conceitos importantes para navegação de bordo de cubesats utilizando magnetômetros fluxgate, mostrando vantagens e procurando alternativas para obtenção de melhores resultados.





Seminário de Iniciação Científica do INPE 2009 – SICINPE 2009.

UTILIZAÇÃO DE MAGNETÔMETRO PARA NAVEGAÇÃO DE BORDO EM UM CUBESAT

Fernando de Souza Savian¹ (CRS/INPE – MCT, Bolsista PIBIC/INPE – CNPq/MCT)

Dr. Roberto Vieira da Fonseca Lopes² (Orientador - DSE/INPE-MCT)

Dr. Nelson Jorge Schuch³ (Co-orientador - CRS/INPE-MCT)

Dr. Nalin Babulal Trivedi⁴ (Co-orientador - DGE/CEA/INPE – MCT)

RESUMO

A navegação de bordo de um satélite envolve a determinação e o controle de sua órbita e de sua atitude. Contudo, em certos casos, é possível apenas determinar a atitude do satélite. Os principais meios para se representar a orientação de um Cubesat são utilizando Ângulos de Euler ou Quatérnions. Ambas as representações convergem para uma matriz de atitude que faz a rotação de um sistema de coordenadas para outro, ou seja, realiza a rotação do sistema de coordenadas de referência para o sistema de coordenadas de observação. A utilização de um magnetômetro para determinação de atitude em um Cubesat se torna interessante devido aos seus baixos valores de custo, tamanho e massa. Porém, se o magnetômetro mede apenas o módulo do Campo Geomagnético, a precisão da determinação da atitude é muito baixa. Uma alternativa estudada para adicionar informações aos dados da atitude de um Cubesat obtida com o magnetômetro é a utilização dos dados da corrente de saída produzida pelos painéis solares. Através dos dados dessa corrente, é possível estimar aproximadamente o ângulo de incidência dos raios do Sol. Entretanto, para obter uma precisão significativa, é possível o uso de um sensor solar, que é um detector de luz visível e mede um ou dois ângulos entre sua superfície e a incidência da luz do Sol. O objetivo deste trabalho é demonstrar como determinar a atitude de órbita de um Cubesat utilizando magnetômetros, analisando a possibilidade do uso de dados da corrente de saída do seu painel solar e também do uso de um sensor solar próprio para essa função. Também é pretendido demonstrar, através de simulações, os resultados esperados para determinadas condições de órbita de Cubesats.

¹ Aluno do Curso de Engenharia Elétrica da UFSM. e-mail: fsavian@lacesm.ufsm.br

² Pesquisador da Divisão de Sistemas Espaciais - DSE/CEA/INPE – MCT. e-mail: roberto@dss.inpe.br

³ Pesquisador do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais - CRS/INPE – MCT.

e-mail: njschuch@lacesm.ufsm.br

⁴ Pesquisador Divisão de Geofísica Espacial - DGE/CEA/INPE – MCT. e-mail: trivedi@dge.inpe.br





IAGA 2009, Sopron, Hungria, 2009.

Abstract

COMPARISON BETWEEN TWO DIFFERENT WAYS OF ATTITUDE DETERMINATION IN THE NANOSATC-BR CUBESAT

SAVIAN, FERNANDO DE SOUZA 1; Lopes, Roberto Vieira da Fonseca 2;
Schuch, Nelson Jorge 1; Durão, Otávio Santos Cupertino 2; Antunes, Cassio Espindola 1; Siqueira, Josemar 1.

1. Southern Regional Space Research Center – CRS/INPE - MCT in collaboration with the Space Science Laboratory of Santa Maria - LACESM/CT-UFSM, Santa Maria, RS, Brazil.
2. National Institute for Space Research–INPE - MCT, São José dos Campos – SP, Brazil.

Nanosatellites, such as the CubeSats, have been used for many scientific space applications. The NANOSATC-BR is a CubeSat nanosatellite that is being developed mainly by undergraduate students from the Federal University of Santa Maria (UFSM), Santa Maria, Rio Grande do Sul (the Brazilian southeast state), who are developing Scientific & Technological Initiation projects at the Southern Regional Space Research Center (CRS/INPE – MCT). One of the objectives of this mission is to observe and measure the Geomagnetic Field module, which does not require attitude information. Some space missions like that of NANOSATC-BR may not require attitude determination and control, but any available information about the attitude is always important for monitoring the behavior of any satellite in orbit. The NANOSATC-BR has a magnetometer that observes the geomagnetic field in the satellite body frame. However, it would be impossible to fully determine the attitude of the nanosatellite, which is tumbling roughly in a torque-free motion, only based on Geomagnetic Field measurements. There are many kinds of attitude sensors that could be considered in order to provide additional attitude information. One is the Solar Sensor, which has a precision of about 1° in stable orbit conditions. As a possible alternative to conventional attitude sensors one could take data from the solar panel of the CubeSat nanosatellite. By observing the current output of the solar panels one may evaluate approximately the incidence angle of Sun rays. The aim of this work is to do a comparison between the attitude determination precision obtained through the magnetometer data combined with the solar panel incidence angle and through the magnetometer data combined with solar sensor observations. Expectedly, the first approach allows a quite poor three-axis attitude determination compared with the accuracy of the second one. The investigation intends to be a contribution to next development steps related to the NANOSATC-BR.

