



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS



CNPq
Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
60 ANOS

**DESENVOLVIMENTO DE INSTRUMENTAÇÃO PARA MEDIDAS
GEOMAGNÉTICAS DE BAIXO RUÍDO NO SOLO E ABORDO DE
NANOSATÉLITES CIENTÍFICOS – CUBESATS**

**RELATÓRIO FINAL ATIVIDADES DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA
(PIBIC/INPE – CNPq/MCTI)**

PROCESSO Nº. 151395/2011-0

Tális Piovesan

Bolsista PIBIC/INPE – CNPq/MCTI

Laboratório de Eletrônica

LE/CRS/CCR/INPE-MCTI

Laboratório de Física Solar do Meio Interplanetário e Magnetosferas

LFSMIM/CRS/CCR/INPE – MCTI

Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais

e-mail: talispiovesan@gmail.com

Dr. Severino Luiz Guimarães Dutra - Orientador

Divisão de Geofísica Espacial

DGE/CEA/INPE – MCTI

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

e-mail: dutra@dge.inpe.br

Santa Maria, Julho de 2012.



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

PROJETO

**DESENVOLVIMENTO DE INSTRUMENTAÇÃO PARA MEDIDAS
GEOMAGNÉTICAS DE BAIXO RUÍDO NO SOLO E ABORDO DE
NANOSATÉLITES CIENTÍFICOS – CUBESATS**

PROCESSO: 151395/2011-0

Relatório elaborado por **TÁLIS PIOVESAN** relatando as atividades executadas
por:

Tális Piovesan- Bolsista PIBIC/INPE – CNPq/MCTI

Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRS/CCR/INPE – MCTI

e-mail: talispiovesan@gmail.com

Dr. Severino Luiz Guimarães Dutra - Orientador

Divisão de Geofísica Espacial – DGE/CEA/INPE – MCTI

e-mail: dutra@dge.inpe.br

Dr. Nelson Jorge Schuch - Co-Orientador

Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRS/CCR/INPE – MCTI

e-mail: njschuch@lacesm.ufsm.br



DADOS DE IDENTIFICAÇÃO:

Bolsista:

Tális Piovesan

Acadêmico de Engenharia Elétrica

Centro de Tecnologia

Universidade Federal de Santa Maria – UFSM

Processo:

PIBIC/INPE – CNPq/MCTI **151395/2011-0**

Orientador:

Dr. Severino Luiz Guimarães Dutra

Divisão de Geofísica Espacial – DGE/CEA/INPE – MCTI

Co-Orientadores:

Dr. Nelson Jorge Schuch

Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRS/CCR/INPE – MCTI

Colaboradores:

Dr. Valdemir Carrara

Divisão de Mecânica Espacial e Controle - DMC/INPE-MCTI

Eng. Tardelli Ronan Coelho Steckel

Engenheiro Eletricista Mestrando no INPE/MCTI, egresso da Universidade Federal de Santa Maria - UFSM

Local de Trabalho/Execução do Projeto:

Laboratório de Eletrônica – LE/CRS/CCR/INPE – MCTI.

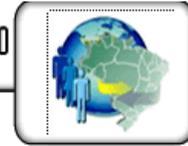
Laboratório de Física Solar do Meio Interplanetário e Magnetosferas - LFSMIM/CRS/CCR/INPE – MCTI.

Observatório Espacial do Sul - OES/CRS/CCR/INPE – MCTI.

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

Laboratório de Integração e Testes – LIT/INPE-MCTI

Laboratório de Simulação e Controle - LABSIM/DMC/ETE/INPE - MCTI



Grupo de Pesquisa

**Clima Espacial, Interações Sol -Terra, Magnetosferas, Geoespaço,
Geomagnetismo: Nanosatélites**

[Identificação](#)

[Recursos
Humanos](#)

[Linhas de
Pesquisa](#)

[Indicadores do
Grupo](#)

Identificação

Dados básicos

Nome do grupo: Clima Espacial, Interações Sol -Terra, Magnetosferas, Geoespaço, Geomagnetismo: Nanosatélites

Status do grupo: **certificado pela instituição**

Ano de formação: 1996

Data da última atualização: 10/04/2012 15:46

Líder(es) do grupo: Nelson Jorge Schuch - 

Natanael Rodrigues Gomes - 

Área predominante: Ciências Exatas e da Terra; Geociências

Instituição: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Órgão:

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

Home page: <http://>

Repercussões dos trabalhos do grupo

O Grupo - CLIMA ESPACIAL, MAGNETOSFERAS, GEOMAGNETISMO:INTERAÇÃO TERRA-SOL, NANOSATÉLITES 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 e DPD/UNIVAP 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 (DLR e Max Planck Institute for Solar System Research), Austrália (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, NANOSATÉLITES. Áreas de interesse: Heliosfera, Física Solar, Meio Interplanetário, Clima Espacial, Magnetosferas, Geomagnetismo, Aeronomia, Ionosferas, Aeroluminescência, Raios Cósmicos, Muons, Desenvolvimento de Nanosatelites Científicos, em especial CubeSats: o NANOSATC-BR1 e NANOSATC-BR2. 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 Babulau Trivedi, Otávio Santos Cupertino Durão, Natanael Rodrigues Gomes.

Recursos humanos

Pesquisadores

Total: 51

Adriano Petry	Jose Humberto Andrade Sobral
Alexandre Alvares Pimenta	Juliano Moro
Alicia Luisa Clúa de Gonzalez	Lilian Piecha Moor
Alisson Dal Lago	Lucas Lopes Costa
Andrei Piccinini Legg	Lucas Ramos Vieira
Antonio Claret Palerosi	Mangalathayil Ali Abdu
Barclay Robert Clemesha	Marco Ivan Rodrigues Sampaio
Carlos Roberto Braga	Marlos Rockenbach da Silva
Cassio Espindola Antunes	Nalin Babulal Trivedi
Clezio Marcos De Nardin	Natanael Rodrigues Gomes
Cristiano Sarzi Machado	Nelson Jorge Schuch
Delano Gobbi	Nivaor Rodolfo Rigozo
Eduardo Escobar Bürger	Odim Mendes Junior
Eurico Rodrigues de Paula	Otavio Santos Cupertino Durão
Ezequiel Echer	Pawel Rozenfeld
Fabiano Luis de Sousa	Petrônio Noronha de Souza
Fernanda de São Sabbas Tavares	Polinaya Muralikrishna
Fernanda Gusmão de Lima	Rajaram Purushottam Kane
Kastensmidt	
Geilson Loureiro	Renato Machado



[Gelson Lauro Dal' Forno](#)

[Ricardo Augusto da Luz Reis](#)

[Guilherme Simon da Rosa](#)

[Rubens Zolar Gehlen Bohrer](#)

[Gustavo Fernando Dessbesell](#)

[Severino Luiz Guimaraes Dutra](#)

[Hisao Takahashi](#)

[Tardelli Ronan Coelho Stekel](#)

[Igor Freitas Faundes](#)

[Walter Demetrio Gonzalez Alarcon](#)

[Jean Pierre Raulin](#)

[William do Nascimento Guareschi](#)

[João Baptista dos Santos Martins](#)

Estudantes

Total: 24

[Adilson José Rambo Pilla](#)

[Leonardo Zavareze da Costa](#)

[Ândrei Camponogara](#)

[Lucas Camponogara Viera](#)

[Bruno Knevitz Hammerschmitt](#)

[Lucas Lourencena Caldas Franke](#)

[Cássio Rodinei dos Santos](#)

[Magdiel Schmitz](#)

[Claudio Machado Paulo](#)

[Maurício Ricardo Balestrin](#)

[Dimas Irion Alves](#)

[Mauricio Rosa de Souza](#)

[Edson Rodrigo Thomas](#)

[Michel Baptistella Stefanello](#)

[Felipe Cipriani Luzzi](#)

[Pietro Fernando Moro](#)

[Fernando Landerdahl Alves](#)

[Tális Piovesan](#)

[Guilherme Paul Jaenisch](#)

[Tiago Bremm](#)

[Iago Camargo Silveira](#)

[Vinícius Deggeroni](#)

[José Paulo Marchezi](#)

[William Ismael Schmitz](#)

Técnicos

Total: 0

Linhas de pesquisa

Total: 4

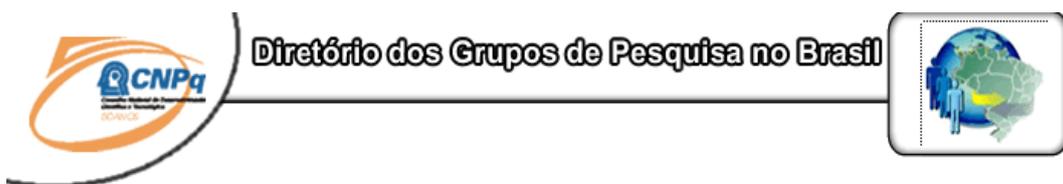
- [AERONOMIA - IONOSFERAS x AEROLUMINESCÊNCIA](#)
- [DESENVOLVIMENTO DE NANOSATÉLITES - CubeSats: NANOSATC-BR](#)
- [MAGNETOSFERAS x GEOMAGNETISMO](#)



- [MEIO INTERPLANETÁRIO - CLIMA ESPACIAL](#)

Relações com o setor produtivo	Total: 2
<ul style="list-style-type: none">• ALPHA SOUTH AMERICA - REPRESENTACOES E CONSULTORIA AEROESPACIAL LTDA - ASARCA PPROV• Lunus Comércio e Representação Ltda - LUNUS	

Indicadores de recursos humanos do grupo	
Integrantes do grupo	Total
Pesquisador(es)	51
Estudante(s)	24
Técnico(s)	0



Linha de Pesquisa

DESENVOLVIMENTO DE NANOSATÉLITES - CubeSats: NANOSATC-BR

Linha de pesquisa
DESENVOLVIMENTO DE NANOSATÉLITES - CubeSats: NANOSATC-BR
Nome do grupo: Clima Espacial, Interações Sol -Terra, Magnetosferas,



Geoespaço, Geomagnetismo: Nanosatélites

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

Pesquisadores:

[Adriano Petry](#)

[Alexandre Alvares Pimenta](#)

[Alicia Luisa Clúa de Gonzalez](#)

[Alisson Dal Lago](#)

[Andrei Piccinini Legg](#)

[Antonio Claret Palerosi](#)

[Cassio Espindola Antunes](#)

[Clezio Marcos De Nardin](#)

[Cristiano Sarzi Machado](#)

[Eduardo Escobar Bürger](#)

[Ezequiel Echer](#)

[Fabiano Luis de Sousa](#)

[Fernanda Gusmão de Lima Kastensmidt](#)

[Geilson Loureiro](#)

[Gelson Lauro Dal' Forno](#)

[Guilherme Simon da Rosa](#)

[Gustavo Fernando Dessbesell](#)

[Igor Freitas Fagundes](#)

[Jean Pierre Raulin](#)

[João Baptista dos Santos Martins](#)

[Jose Humberto Andrade Sobral](#)

[Lilian Piecha Moor](#)

[Lucas Lopes Costa](#)

[Marlos Rockenbach da Silva](#)

[Nalin Babulal Trivedi](#)

[Natanael Rodrigues Gomes](#)

[Nelson Jorge Schuch](#)

[Nivaor Rodolfo Rigozo](#)



Relatório Final de Atividades 2012

[Odim Mendes Junior](#)

[Otavio Santos Cupertino Durão](#)

[Pawel Rozenfeld](#)

[Petrônio Noronha de Souza](#)

[Renato Machado](#)

[Ricardo Augusto da Luz Reis](#)

[Rubens Zolar Gehlen Bohrer](#)

[Severino Luiz Guimaraes Dutra](#)

[Tardelli Ronan Coelho Stekel](#)

[Walter Demetrio Gonzalez Alarcon](#)

[William do Nascimento Guareschi](#)

Estudantes:

[Adilson José Rambo Pilla](#)

[Ândrei Camponogara](#)

[Dimas Irion Alves](#)

[Fernando Landerdahl Alves](#)

[Guilherme Paul Jaenisch](#)

[Iago Camargo Silveira](#)

[José Paulo Marchezi](#)

[Leonardo Zavareze da Costa](#)

[Lucas Lourencena Caldas Franke](#)

[Magdiel Schmitz](#)

[Maurício Ricardo Balestrin](#)

[Mauricio Rosa de Souza](#)

[Pietro Fernando Moro](#)

[Tális Piovesan](#)

[Tiago Bremm](#)

[Vinícius Deggeroni](#)

[William Ismael Schmitz](#)

Árvore do conhecimento:

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



Relatório Final de Atividades 2012

Científica; Engenharias; Engenharia Aeroespacial; Engenharia Aeroespacial - Pequenos Satélites;

Setores de aplicação:

Aeronáutica e Espaço

Objetivo:

Pesquisas: Geoespaço e Nanosatélites Científicos - Iniciação Científica & Tecnológica: CubeSats: (100g-1Kg) o NANOSATC-BR1 e (1Kg-10Kg) o NANOSATC-BR2; Carga útil: magnetômetros, sondas de Langmuir, fotômetros/imageadores e detector de partículas; Desenvolvimentos Engenharias/Tecnologias Espaciais: estrutura mecânica, computador-bordo, programas, estação terrena, testes/integração. Sub-sistemas: potencia, propulsão, telemetria, térmico controle/atitude. Vice-Líder: Otávio Santos Cupertino Durão



Diretório dos Grupos de Pesquisa no Brasil



Linha de Pesquisa

MAGNETOSFERAS x GEOMAGNETISMO

Linha de pesquisa

MAGNETOSFERAS x GEOMAGNETISMO

Nome do grupo: [Clima Espacial, Interações Sol -Terra, Magnetosferas, Geoespaço, Geomagnetismo: Nanosatélites](#)

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:

[Alexandre Alvares Pimenta](#)

[Alisson Dal Lago](#)

[Cassio Espindola Antunes](#)

[Clezio Marcos De Nardin](#)

[Eduardo Escobar Bürger](#)

[Gelson Lauro Dal' Forno](#)

[Lilian Piecha Moor](#)

[Lucas Lopes Costa](#)

[Mangalathayil Ali Abdu](#)

[Marlos Rockenbach da Silva](#)

[Nalin Babulal Trivedi](#)

[Nivaor Rodolfo Rigozo](#)

[Pawel Rozenfeld](#)

[Severino Luiz Guimaraes Dutra](#)

[Tardelli Ronan Coelho Stekel](#)

Estudantes:

[Claudio Machado Paulo](#)

[Dimas Irion Alves](#)

[Edson Rodrigo Thomas](#)

[José Paulo Marchezi](#)

[Leonardo Zavareze da Costa](#)

[Lucas Camponogara Viera](#)

[Lucas Lourencena Caldas Franke](#)

[Pietro Fernando Moro](#)

[Tális Piovesan](#)

[Tiago Bremm](#)

Árvore do conhecimento:

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



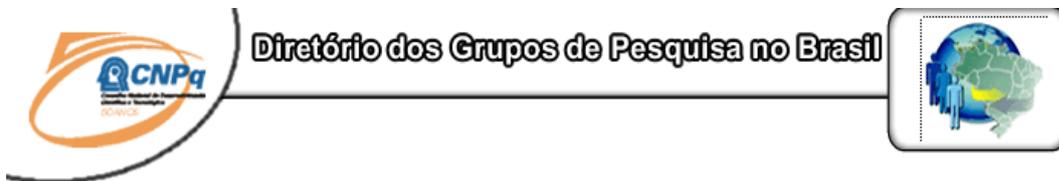
Espacial; Ciências Exatas e da Terra; Geociências; Instrumentação Científica;

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.



Linha de Pesquisa

MEIO INTERPLANETÁRIO - CLIMA ESPACIAL

Linha de pesquisa

MEIO INTERPLANETÁRIO - CLIMA ESPACIAL

Nome do grupo: [Clima Espacial, Interações Sol -Terra, Magnetosferas, Geoespaço, Geomagnetismo: Nanosatélites](#)

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

Pesquisadores:



Relatório Final de Atividades 2012

[Adriano Petry](#)
[Alexandre Alvares Pimenta](#)
[Alicia Luisa Clúa de Gonzalez](#)
[Alisson Dal Lago](#)
[Andrei Piccinini Legg](#)
[Carlos Roberto Braga](#)
[Cassio Espindola Antunes](#)
[Eduardo Escobar Bürger](#)
[Ezequiel Echer](#)
[Jean Pierre Raulin](#)
[Juliano Moro](#)
[Lilian Piecha Moor](#)
[Lucas Lopes Costa](#)
[Lucas Ramos Vieira](#)
[Marlos Rockenbach da Silva](#)
[Nelson Jorge Schuch](#)
[Nivaor Rodolfo Rigozo](#)
[Rajaram Purushottam Kane](#)
[Renato Machado](#)
[Rubens Zolar Gehlen Bohrer](#)
[Severino Luiz Guimaraes Dutra](#)
[Tardelli Ronan Coelho Stekel](#)
[Walter Demetrio Gonzalez Alarcon](#)

Estudantes:

[Adilson José Rambo Pilla](#)
[Bruno Knevitz Hammerschmitt](#)
[Claudio Machado Paulo](#)
[Dimas Irion Alves](#)
[Iago Camargo Silveira](#)
[José Paulo Marchezi](#)
[Leonardo Zavareze da Costa](#)
[Lucas Camponogara Viera](#)



Relatório Final de Atividades 2012

[Magdiel Schmitz](#)

[Mauricio Rosa de Souza](#)

[Michel Baptistella Stefanello](#)

[Pietro Fernando Moro](#)

[Tális Piovesan](#)

[Tiago Bremm](#)

[Vinícius Deggeroni](#)

[William Ismael Schmitz](#)

Árvore do conhecimento:

Ciências Exatas e da Terra; Geociências; Geofísica Espacial;

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.

AGRADECIMENTOS



Relatório Final de Atividades 2012

Agradeço ao Dr. Nelson Jorge Schuch por todo o apoio, disponibilidade, amizade e ensinamentos recebidos a todo momento, bem como a oportunidade de estudar e desenvolver pesquisas em Ciências & Tecnologias Espaciais no Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais - CRS/CCR/INPE-MCTI.

Ao Dr. Severino Luis Guimarães Dutra pela disponibilidade e apoio durante o desenvolvimento do Projeto de Pesquisa.

Ao Dr. Valdemir Carrara pela atenção, apoio e ensinamentos adquiridos durante o período de estágio técnico desenvolvido na sede do INPE-MCTI, em São José dos Campos-SP, bem como em Santa Maria-RS.

Ao Eng. Tardelli R. C. Steckel e aos colegas de laboratórios, e amigos, Lucas Lourencena Caldas Franke, Fernando Landerdhal Alves, Ândrei Camponogara, Maurício Ricardo Balestrin, Guilherme Paul Jaenisch e Iago Camargo pelo companheirismo e apoio durante o andamento do Projeto.

A todos, Muito Obrigado.



SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	15
1- RESUMO	20
2- INTRODUÇÃO	21
3 - FUNDAMENTAÇÕES TEÓRICAS	22
3.1 – ESTUDO DO CAMPO GEOMAGNÉTICO	22
3.2- MAGNETOMETRIA:	24
3.2.1- MAGNETÔMETRO <i>FLUXGATE</i> :	25
4 - ATIVIDADES DESENVOLVIDAS	28
4.1 - ESTUDO DAS CARACTERÍSTICAS E LINEARIDADE DE UM SENSOR DE NÚCLEO EM ANEL	28
4.1.2 - PROJETO DO CIRCUITO AMPLIFICADOR:	28
4.1.3 - ANÁLISE AC DO AMPLIFICADOR:	30
4.1.4 - RESULTADOS PARCIAIS:	36
4.2 - COLETA DE DADOS E ANÁLISE DO MAGNETÔMETRO <i>FLUXGATE</i> NAROD:	36
4.3 - UTILIZAÇÃO DOS MAGNETÔMETROS EM APLICAÇÕES ESPACIAIS:	38
4.3.1- CUBESATS	38
4.3.2 - DETERMINAÇÃO E CONTROLE DE ATITUDE	40
4.3.2.1 - CONCEITO	40
4.3.2.2 – CONTROLE	41
4.3.2.3 - ANÁLISE DE MISSÃO	42
4.3.2.4 - SIMULAÇÃO E ANÁLISE DO CONTROLE DE ATITUDE DO CUBESAT	44
5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS	49
6 - BIBLIOGRAFIA	50

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1- Representação da magnetosfera terrestre em interação com o vento solar, de modo a comprimir a face de incidência direta e formar uma espécie de calda à face oposta	23
Figura 2- Representação do globo terrestre e as faixas de valores de indução magnética, em especial a região da Anomalia Magnética do Atlântico Sul - AMAS, em vermelho.	23
Figura 3- Representação das componentes vetoriais do Campo Geomagnético	24
Figura 4- Topologia do magnetômetro fluxgate desenvolvido pelo ex-bolsista do Laboratório de Eletrônica do CRS, Eng. Cássio Espíndola Antunes.....	25
Figura 5- Bobina de excitação de um magnetômetro Fluxgate envolvendo o núcleo ferromagnético em formato de anel, com baixa coercibilidade.	26
Figura 6- Bobina de Detecção do Magnetômetro e seus terminais.....	26
Figura 7- Curva de histerese de um material ferromagnético e a representação dos domínios magnéticos.....	27
Figura 8- Representação do Circuito Amplificador	29
Figura 9- Circuito equivalente da análise AC	31
Figura 10- Montagem do circuito amplificador na Protoboard.....	32
Figura 14- Forma de onda resultante da saída dos terminais da bobina sensora, com a frequência de aproximadamente duas vezes a frequência de entrada .	34
Figura 15- Forma de onda resultante da saída dos terminais da bobina sensora com a frequência de excitação de 5 kHz.....	35
Figura 16- Forma de onda resultante da saída dos terminais da bobina sensora com a frequência de excitação de 10 kHz.....	35
Figura 17- Gráfico das medições das componentes H,D,Z do Campo Magnético no Observatório Espacial do Sul, em São Martinho da Serra, pelo magnetômetro NAROD.	37
Figura 18- Gráfico das medições das componentes H,D,Z do Campo Magnético no Observatório Espacial do Sul, em São Martinho da Serra, pelo magnetômetro NAROD, apresentando defeitos na assimilação de dados.....	37

Figura 19- Representação do nanosatélite científico da classe CubeSat, NANOSATC-BR1	39
Figura 20- Diagrama de blocos do sistema de controle de malha fechada do CubeSat NANOSATC-BR1	41
Figura 21- Gráfico com a visualização das velocidades angulares nos eixos x, y e z do CubeSat sem a aplicação de um sistema de controle	44
Figura 22- Gráfico representativo dos ângulos de Euler	45
Figura 23 – Gráfico da velocidade angular do CubeSat	46
Figura 24- Arquivo de texto gerado nas simulações no Matlab	47
Figura 25- Figura gerada no software POV, que demonstra a posição do satélite em sua órbita espacial.	48

1- RESUMO

O planeta Terra é circundado por um campo magnético. Ele está presente em distâncias tão grandes quanto centenas de raios terrestres, se origina nas correntes elétricas que circulam no núcleo externo do planeta e apresenta também contribuições do material magnetizado da crosta e das correntes existentes no geoespaço e das induzidas no solo. Sua intensidade não é uniforme ao redor da Terra e na região sul do Brasil está situada a Anomalia Magnética do Atlântico Sul (AMAS), lugar onde o campo geomagnético tem sua menor intensidade. Magnetômetros são os instrumentos utilizados para monitorar o campo geomagnético, usualmente as componentes H, D, Z. As medidas obtidas são fundamentais para o estudo dos fenômenos originados pela interação Sol-Terra – como aqueles decorrentes da atividade solar (ejeção de massa coronal, entre outros), o que altera substancialmente o estado da magnetosfera terrestre – e importantes em várias aplicações espaciais. O Projeto tem por objetivo o desenvolvimento no Laboratório de Eletrônica do CRS/CCR/INPE-MCTI de magnetômetros de núcleo saturado (fluxgate), com obtenção de suas características e circuitos elétricos e posterior aplicações espaciais, como o modelo *International Geomagnetic Reference Field* (IGRF) e propagação na órbita e aquisição de vetores de posicionamento do Sistema de Controle de Atitude e Órbita Espacial em Nanosatélites da Classe CubeSat, do Programa NANOSATC-BR, Desenvolvimento de CubeSats.

2- INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de Pesquisas em Ciências Espaciais são de grande importância para o meio científico, acadêmico e o setor industrial, visto que é neste setor onde ocorrem as inovações tecnológicas em circuitos elétricos, desenvolvimento de softwares, confecção de chips e PCB's (printed circuit board).

Os magnetômetros e suas aplicações, que são o foco do Projeto de Pesquisa, desempenham um papel fundamental no estudo e monitoramento das mudanças climáticas, com o monitoramento das atividades solares e a Anomalia Magnética do Atlântico Sul (AMAS), que desloca-se ao redor do globo Terrestre com o passar do tempo; e o uso dos magnetômetros e seus dados para o uso em satélites, como o Sistema de Determinação de Atitude e Controle, que é de grande importância para o sucesso de uma missão espacial e que o Brasil ainda não possui um domínio definitivo desta área, fato constatado pela compra desta tecnologia para a aplicação no satélite sino-brasileiro CBERS-3, que será lançado em parceria com a China no final do ano de 2012.

Para o desenvolvimento do Projeto desenvolveu-se experimentos práticos em laboratório, programação e simulações em softwares matemáticos, onde as ênfases foram dadas ao Nano Satélite científico NANOSATC-BR1, do Projeto NANOSATC-BR, Desenvolvimento de CubeSats, onde o Acadêmico Tális Piovesan é integrante.

3 - FUNDAMENTAÇÕES TEÓRICAS

3.1 – ESTUDO DO CAMPO GEOMAGNÉTICO

O Planeta Terra é circundado por uma camada protetora denominada Magnetosfera, que é um Campo Magnético gerado em quase sua totalidade por correntes do plasma internos à crosta terrestre, além da interação com os outros planetas do Sistema Solar (CAMPBELL, 1997), expressa por (1).

$$\vec{B}_t = \vec{B}_{geo} + \vec{B}_{plan} + \vec{B}_{min} \quad (1)$$

Onde \vec{B}_t é o vetor de indução magnética, e representa o produto do Campo Magnético pela permeabilidade magnética μ do meio, onde sua intensidade é medida em Teslas [T], expressa em (2).

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H} \quad (2)$$

A intensidade deste Campo Magnético não permanece constante ao redor do Globo, e sofre alterações diárias devido à interação solar, como as tempestades solares e demais partículas advindas do meio espacial, Figura 1.

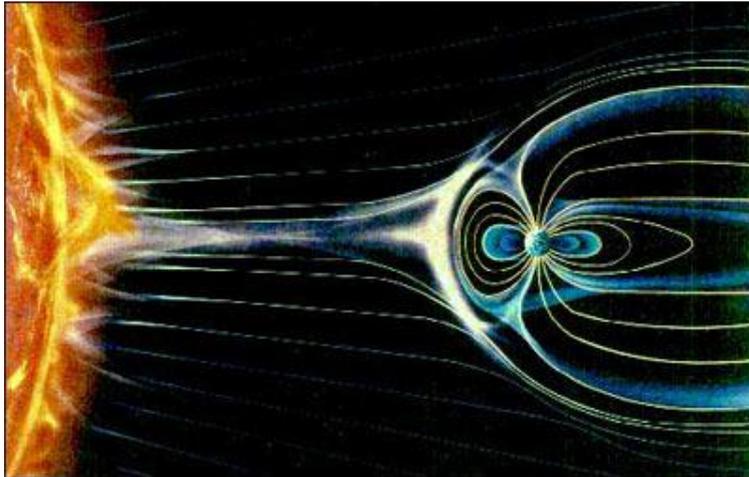


Figura 1- Representação da magnetosfera terrestre em interação com o vento solar, de modo a comprimir a face de incidência direta e formar uma espécie de calda à face oposta
Fonte: <http://ciencia.hsw.uol.com.br/auroras2.htm>

O fenômeno faz com que haja uma região na qual apresenta os menores índices de indução magnética, a denominada Anomalia Magnética do Atlântico Sul - AMAS, que possui seu ponto crítico no Paraguai, chegando aos valores de 22.500 nanoteslas (nT), Figura 2, porém, afeta em algumas partes da Região Sul do Brasil, principalmente o Rio Grande do Sul, onde a precipitação de partículas espaciais é maior do que em outras partes do Planeta.

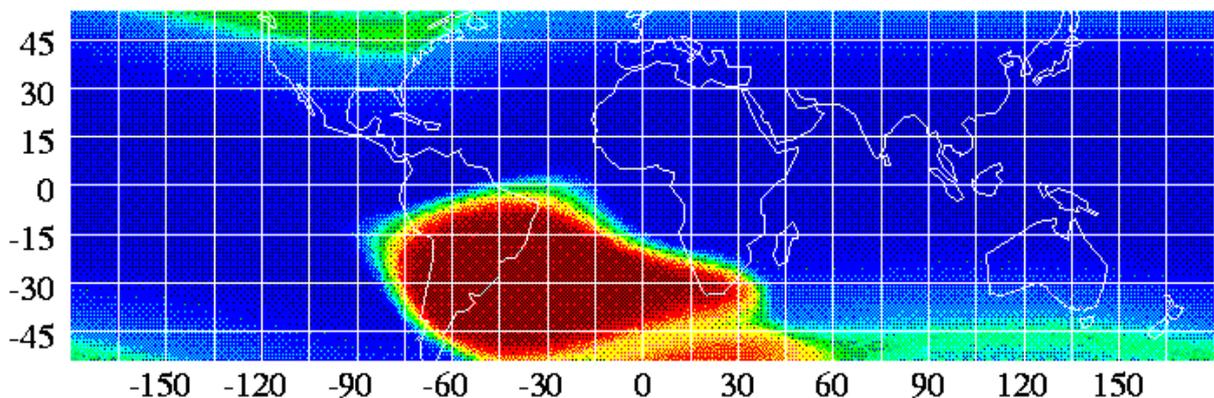


Figura 2- Representação do globo terrestre e as faixas de valores de indução magnética, em especial a região da Anomalia Magnética do Atlântico Sul - AMAS, em vermelho.
Fonte: http://heasarc.nasa.gov/docs/rosat/gallery/misc_saad.html

3.2.1- MAGNETÔMETRO FLUXGATE:

O Magnetômetro *Fluxgate* é um instrumento no qual apresenta em sua composição dois circuitos fundamentais: o circuito de excitação de uma bobina ferromagnética e o circuito de detecção da variação do Campo Geomagnético, tal topologia pode ser visualizada na Figura 4.

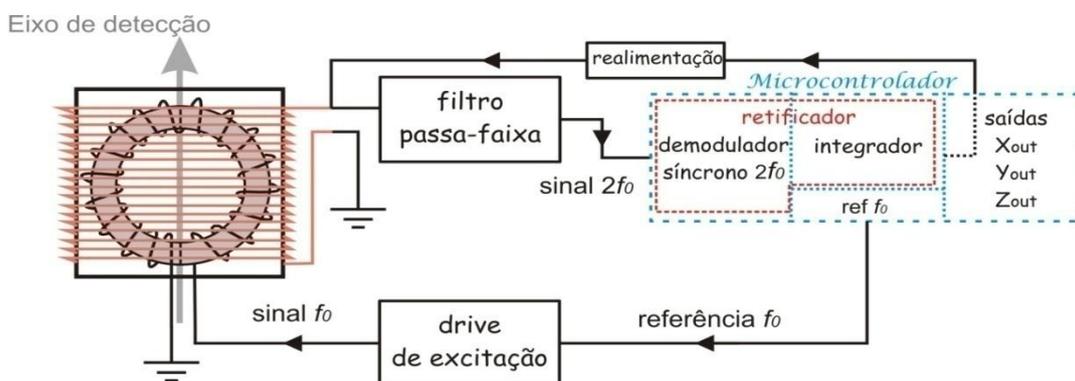


Figura 4-Topologia do magnetômetro fluxgate desenvolvido pelo ex-bolsista do Laboratório de Eletrônica do CRS, Eng. Cássio Espíndola Antunes.
Fonte: ANTUNES, C. E., 2009.

São usados três sensores para efetuar a medição das componentes ortogonais do Campo Magnético Terrestre, H, D, Z, os quais são constituídos por um núcleo ferromagnético em formato toroidal e duas bobinas principais, sendo que uma delas é responsável pela excitação do núcleo, Figura 5, de forma variável, e a outra bobina que capta a variação do Campo Magnético e induz tensões em seus terminais devido à Lei de Faraday, expressa em (3), Figura 6.

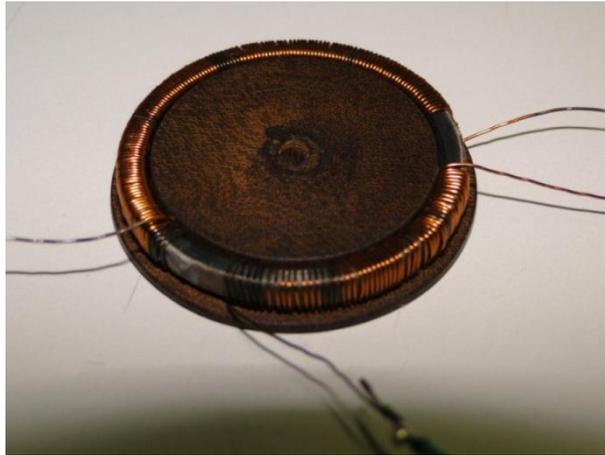


Figura 5- Bobina de excitação de um magnetômetro Fluxgate envolvendo o núcleo ferromagnético em formato de anel, com baixa coercibilidade.



Figura 6-Bobina de Detecção do Magnetômetro e seus terminais.

$$V = -n \cdot \frac{d\Phi}{dt} \quad (3)$$

Onde n representa o número de espiras da bobina de excitação.

O sinal detectado terá o dobro da frequência de excitação, visto que são induzidas tensões na bobina sensora nos dois momentos em que o núcleo ferromagnético passa do estado de saturação para magnetismo nulo, visualizado na curva de histerese de um material ferromagnético, Figura 7.

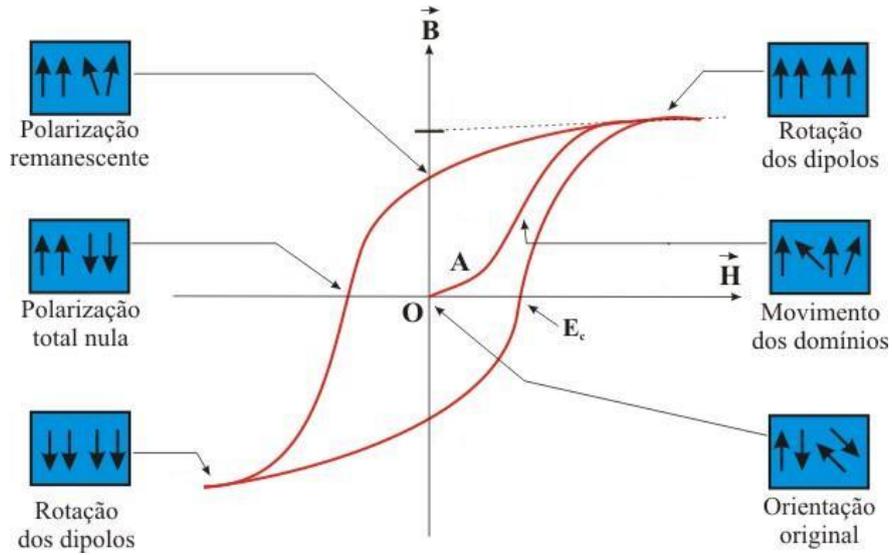


Figura 7-Curva de histerese de um material ferromagnético e a representação dos domínios magnéticos.

Fonte: http://ferroeletricos.com/comportamento_ferroeletrico.html

4 - ATIVIDADES DESENVOLVIDAS

4.1 - ESTUDO DAS CARACTERÍSTICAS E LINEARIDADE DE UM SENSOR DE NÚCLEO EM ANEL

Para analisar o comportamento e as características de um sensor do Campo Geomagnético, a fim de identificar melhores condições de funcionamento, menor índice de ruídos e menor gasto de energia, foram desenvolvidos testes em um sensor de um magnetômetro de núcleo saturado, com sensor em anel, com a aplicação de várias frequências de excitação e formas de onda na bobina de excitação do sensor.

Os materiais utilizados foram:

- Gerador de funções;
- Multímetro digital;
- Fonte de tensão contínua;
- *Protoboard*;

Inicialmente foi aplicado à bobina de excitação do sensor uma tensão de 5 V, com formato de onda quadrada. Como o Campo Geomagnético apresenta valores pequenos (em torno de 25000 nT) a tensão induzida nos terminais da bobina de detecção foram muito pequenos. Desta forma foi desenvolvido um circuito amplificador com o uso de dois transistores de junção bipolar unidos em forma de cascata, assim ocorre um ganho do sinal a ser amplificado, obtendo níveis de tensão mais elevados, identificando com maior clareza as perturbações no Campo Geomagnético.

4.1.2 - PROJETO DO CIRCUITO AMPLIFICADOR:

A frequência aplicada à bobina de excitação é na faixa de kHz. Assim optou-se pelo uso de um transistor de junção bipolar (TJB), pois apresenta poucas capacitâncias parasitas em médias e altas frequências, diferentemente do transistor de efeito de campo (FET).

Os transistores escolhidos foram do modelo **BC 338**, com o valor de β iguais a 205. A corrente de coletor (I_c) foi fixada em **4mA**, a tensão de alimentação contínua V_{cc} foi definida em **12V**, e os valores das resistências **R1, R2, Rc e RE** foram definidos pelas regras de projeto, tomadas como referência o livro **Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos**, [12].

- *Regras de Projeto:*

- $V_{CE} = V_{cc}/2$

- $V_E \leq 0,1 * V_{cc}$

- $R_2 \leq 0,1 * \beta * R_E$

A melhor visualização do circuito amplificador pode ser feita na Figura 8.

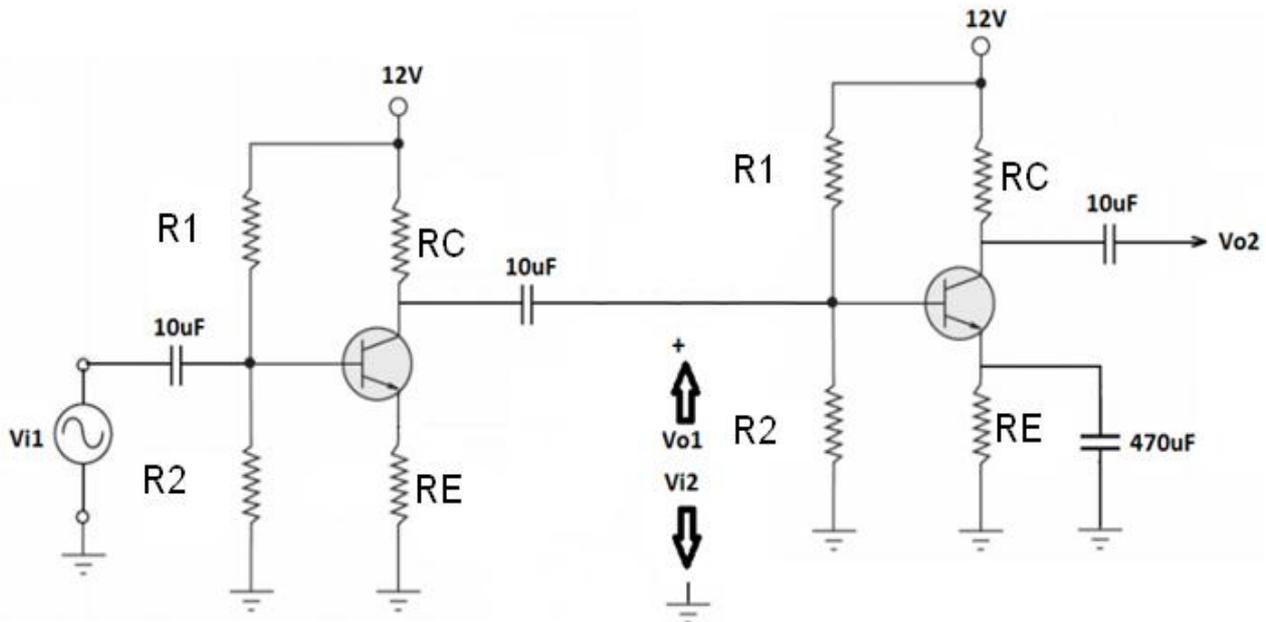


Figura 8- Representação do Circuito Amplificador

$$V_E = 0,1 * 12$$

$$* V_E = 1,2V$$

$$R_E = \frac{V_E}{I_e}$$

$$RE = \frac{1,2}{4 \times 10^{-3}}$$

$$* RE = 300\Omega$$

$$VCE = 12/2$$

$$* VCE = 6V$$

$$VRC = Vcc - VCE$$

$$VRC = 12 - 6 - 1,2$$

$$VRC = 4,8V$$

$$RC = VRC/IC$$

$$* RC = 1,125k\Omega$$

$$R2 = 0,1 * 205 * 330$$

$$* R2 = 6,150k\Omega$$

$$Vth = \frac{R2}{R1 + R2} * Vcc$$

$$1,9 = \frac{6150}{R1 + 6150} * 12$$

$$* R1 = 32,692k\Omega$$

4.1.3 - ANÁLISE AC DO AMPLIFICADOR:

Para fazer a análise AC dos dois transistores de junção bipolar e determinar o ganho da associação dos transistores em cascata foi determinada primeiramente a resistência interna do transistor Re , que é dada pela fórmula

$$Re = \frac{26mV}{IE}$$

$$Re = \frac{26 \times 10^{-3}}{4 \times 10^{-3}}$$

$$Re = 6,5\Omega$$

Após encontrar este valor, conseguiu-se representar o circuito equivalente para a análise AC, Figura 9, com todos os valores de resistências e posteriormente as impedâncias de entrada Z_{i} e a de saída Z_{o} .

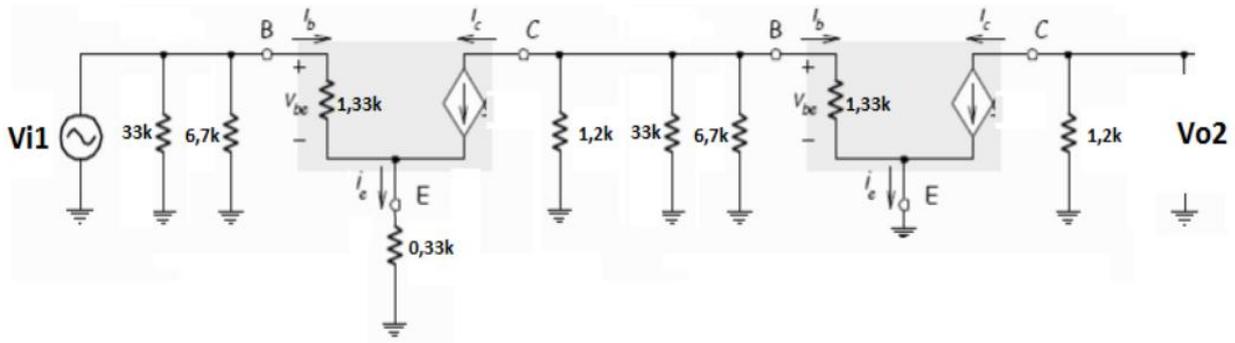


Figura 9- Circuito equivalente da análise AC

A impedância de entrada Z_i é dada por:

$$Z_i = 33k \parallel 6,7k \parallel 1,33K$$

$$Z_i = 1075,24\Omega$$

A impedância de saída Z_o é igual a **1,2 k Ω** .

O ganho total AvT é o resultado da multiplicação dos ganhos dos dois transistores. Portanto, segue que:

$$AvT = Av1 * Av2$$

$$Av1 = (1200 \parallel 33000 \parallel 6700 \parallel 1300)/(6,5+330)$$

$$Av1 = -1,685$$

Ou seja, o sinal negativo representa a inversão de fase do sinal amplificado.

$$Av2 = 1200/6,5$$

$$Av2 = -184,6$$

$$AvT = (-1,685) * (-184,6)$$

$$AvT = 311,05$$

A montagem do experimento realizado na *protoboard* pode ser visualizada na Figura 10.

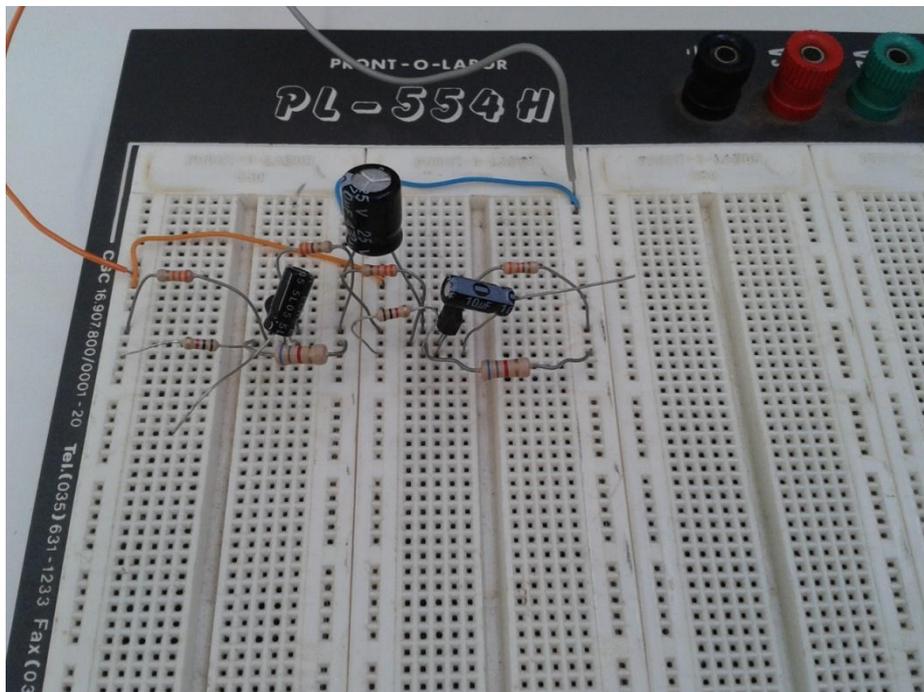


Figura 10- Montagem do circuito amplificador na Protoboard.

Após a montagem do experimento foi aplicado um sinal senoidal à entrada do circuito amplificador, Figura 11, e os resultados obtidos podem ser vistos na Figura 12.

Relatório Final de Atividades 2012

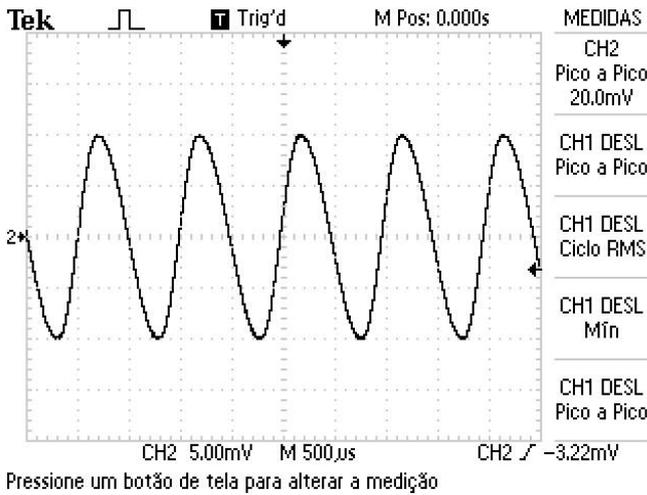


Figura 11-Sinal de senoidal de entrada de 20 mVpp.

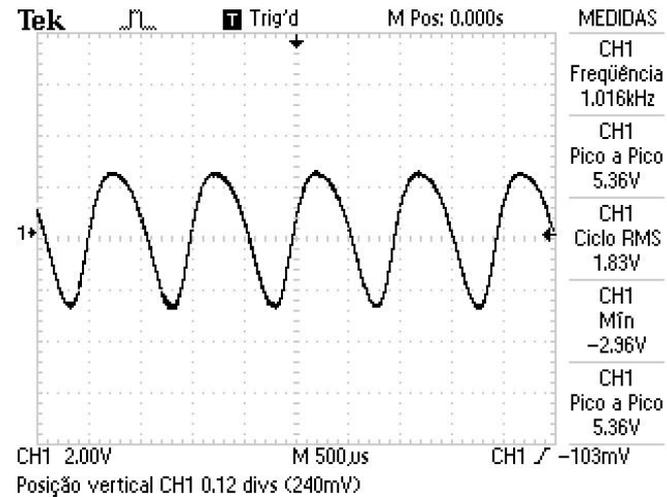


Figura 12- Sinal de saída, de 5,36 Vpp

Após o desenvolvimento do circuito amplificador foram executados testes para analisar o comportamento da bobina sensora em relação à aplicação de vários níveis de tensão e frequência à bobina de excitação. A Figura 13 representa a montagem do circuito elétrico executado em uma *protoboard*.

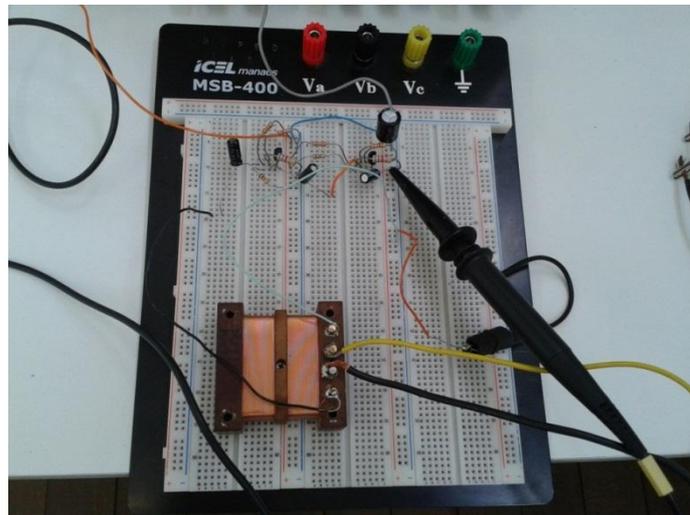


Figura 13- Montagem do circuito amplificador acrescido do sensor do Campo Geomagnético

Para a primeira análise, foi aplicado ao circuito de excitação uma tensão com onda quadrada de 0,5 Vpp de amplitude e uma frequência de 4 kHz. O resultado pode ser visualizado na Figura 14.

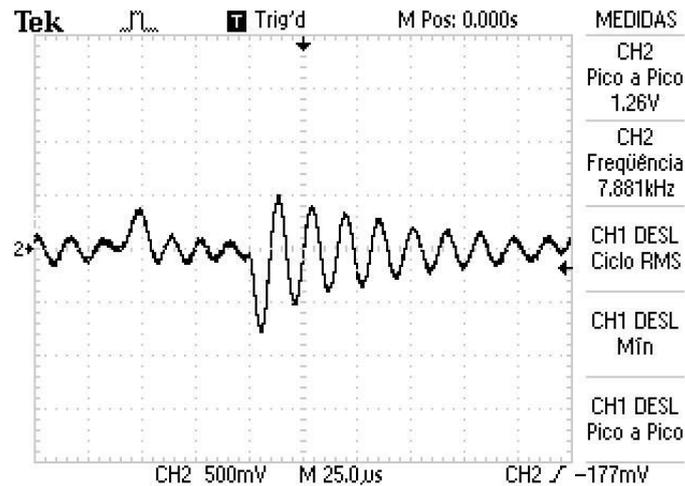


Figura 14- Forma de onda resultante da saída dos terminais da bobina sensora, com a frequência de aproximadamente duas vezes a frequência de entrada

A segunda análise foi feita com a aplicação de uma tensão com onda quadrada de 0,5 Vpp de amplitude e uma frequência de 5 kHz. O resultado pode ser visualizado na Figura 15.

Relatório Final de Atividades 2012

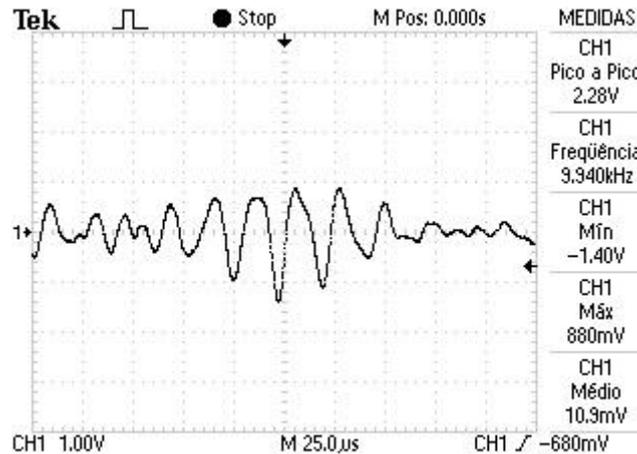


Figura 15- Forma de onda resultante da saída dos terminais da bobina sensora com a frequência de excitação de 5 kHz

A terceira análise foi feita com a aplicação de uma tensão com onda quadrada de 0,5 Vpp de amplitude e uma frequência de 10 kHz. O resultado pode ser visualizado na Figura 16.

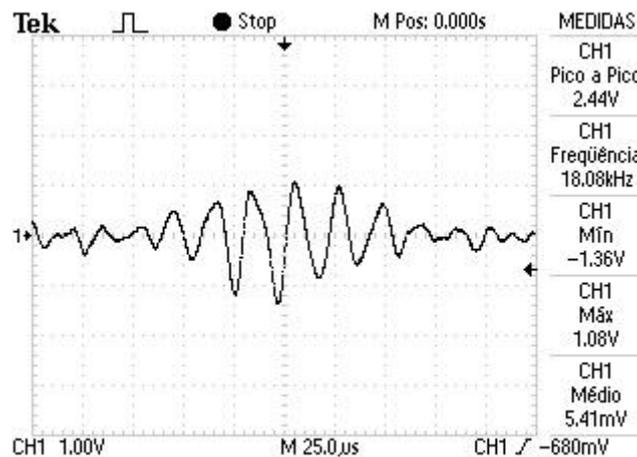


Figura 16- Forma de onda resultante da saída dos terminais da bobina sensora com a frequência de excitação de 10 kHz

4.1.4 - RESULTADOS PARCIAIS:

Com a análise executada em bancada de laboratório percebeu-se que o sinal a ser aplicado à bobina de excitação deve ser baixo, para a saída não entre em saturação. Quanto maior a frequência aplicada ao circuito maior é o aumento da tensão induzida, porém o sinal fica propício a ruídos. Em bancada, quando aproximavam-se objetos metálicos próximos ao sensor, como esperado, o sinal medido sofria alterações bruscas nos maiores valores de frequência. Para o futuro do Projeto, necessita-se aprimorar o circuito de detecção para identificar com precisão os resultados encontrados, bem como, aplicar filtros para diminuir os índices de ruídos das medições e após este processo fazer a calibração das medições com outro magnetômetro em plenas condições de funcionamento.

4.2 - COLETA DE DADOS E ANÁLISE DO MAGNETÔMETRO FLUXGATE NAROD:

No Observatório Espacial do Sul, em São Martinho da Serra, são coletados dados do Magnetômetro *Fluxgate* NAROD, que são posteriormente analisados nos laboratórios do CRS. Na Figura 17 pode-se observar a medição do dia 01/08/2010.

A Figura 18 demonstra a variação das três componentes H, D e Z do Campo Geomagnético ao longo do dia, onde o tempo é medido em horas e no horário GMT.

As variações observadas na Figura 17 ocorrem devido a interação do *Vento Solar* com a Magnetosfera, promovendo campos magnéticos em oposição ao Planeta. Pode-se notar o ruído na medição, onde a linha encontra-se mais espessa, possivelmente ocasionada pela variação da corrente de alimentação do aparelho, ou até mesmo a interferência advinda de objetos metálicos utilizados por pessoas quando da manutenção do sítio do Observatório.

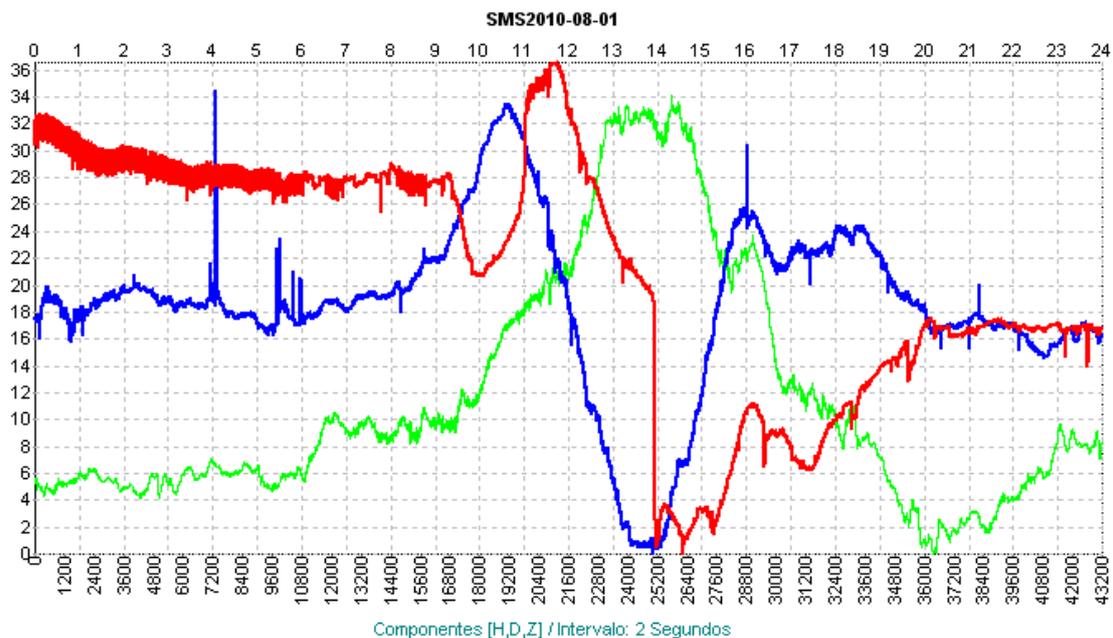


Figura 17- Gráfico das medições das componentes H,D,Z do Campo Magnético no Observatório Espacial do Sul, em São Martinho da Serra, pelo magnetômetro NAROD.

Desde o período de fevereiro de 2011 o Magnetômetro Nardod apresentou problemas na assimilação dos dados, e de modo comparativo, os mesmos podem ser visualizados na Figura 18.

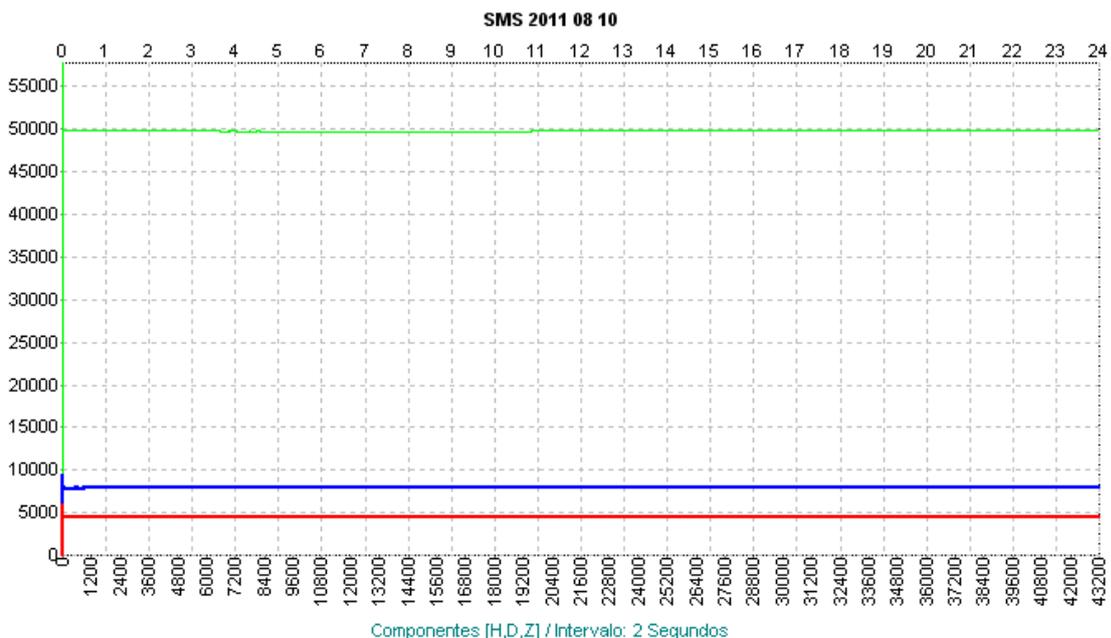


Figura 18-Gráfico das medições das componentes H,D,Z do Campo Magnético no Observatório Espacial do Sul, em São Martinho da Serra, pelo magnetômetro NAROD, apresentando defeitos na assimilação de dados.

4.3 - UTILIZAÇÃO DOS MAGNETÔMETROS EM APLICAÇÕES ESPACIAIS:

Os dados coletados pelos magnetômetros e a propagação em tempo real do modelo do Campo Geomagnético pelo *International Geomagnetic Reference Field (IGRF)*, são alguns dos principais parâmetros utilizados para o **Sistema de Determinação de Atitude e Controle** em aplicações espaciais, como satélites, ou a Estação Espacial Internacional (ISS).

O sistema tem as funções de:

- **Determinar a posição exata da órbita do satélite;**
- **Posicionar o satélite** de modo que os sistemas de comunicação entre a estação Terrena e o satélite permaneçam ativos;
- **Otimização da geração da energia elétrica** pela conversão fotovoltaica, por meio do controle da incidência dos raios solares nos painéis fotovoltaicos.
- **Controle térmico do satélite**, visto que a temperatura altera substancialmente o funcionamento de componentes eletrônicos dos satélites e outras aplicações.

4.3.1- CUBESATS

Um tipo de satélites vem sendo largamente estudado e desenvolvido por instituições de ensino com universidades ao redor do mundo, que são os nanosatélites da classe CubeSats, que possuem 10cm de aresta, volume de 1 litro e massa inferior à 1,4 quilogramas, Figura 19. O projeto CubeSats foi desenvolvido no Departamento de Aeronáutica e Astronáutica na Universidade de Stanford nos Estados Unidos da América, no ano de 1999, pelo Professor Bob Twiggs, Especialista em Engenharia Aeroespacial e sua equipe.

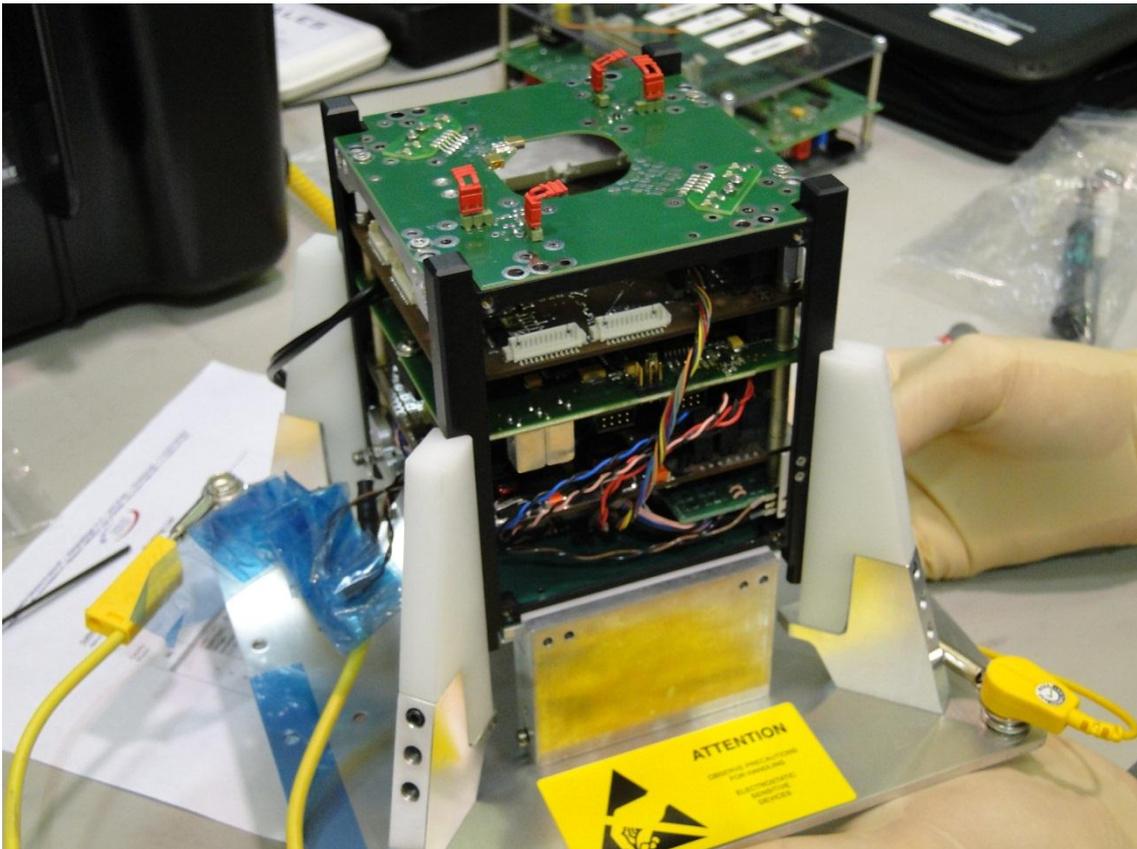


Figura 19- Representação do nanosatélite científico da classe CubeSat, NANOSATC-BR1

No Brasil, os pioneiros no estudo e o desenvolvimento de tecnologias embarcadas em CubeSats é o Projeto NANOSATC-BR, Desenvolvimento de CubeSats, com sede no Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais CRS/CCR/INPE-MCTI, onde o projeto pretende enviar até o final de 2012 o primeiro Nanosatélite Brasileiro, o NANOSATC-BR1, de categoria 1U.

O Projeto prevê o lançamento de outros satélites para o estudo do clima espacial, teste e validação de circuitos integrados, no futuro, para atuar em missões de segurança e telecomunicações.

4.3.2 - DETERMINAÇÃO E CONTROLE DE ATITUDE

4.3.2.1 - CONCEITO

A Determinação de Atitude de um satélite pode ser descrita como sua orientação espacial em relação a um eixo de referência inercial, que pode ser fixo, ou variável como a orientação do Campo Magnético Terrestre (WERTZ, 1978). É uma quantidade relacionada com sua informação rotacional e pode ser definida como um operador matemático rotacional, uma matriz ou um quatérnion (KUIPERS, 2002).

Para expressar a orientação de um satélite segundo suas rotações em torno dos eixos x, y, z do sistema inercial utiliza-se a representação por ângulos de Euler. A relação entre o sistema inercial e o sistema do satélite é dada por (4).

$$A = R(\varphi, \theta, \psi) \quad (4)$$

Para determinar a matriz de atitude de um corpo podem ser utilizados diversos métodos. Entre os métodos mais usuais, encontram-se o Método Ótimo e o Método Determinístico. O segundo representa um menor custo computacional e sua principal implementação em algoritmo é o Método TRIAD. O Método TRIAD é um algoritmo que necessita de apenas dois vetores de observação (\vec{w}_i), medidos no sistema de referência do satélite em órbita, e dois vetores correspondentes (\vec{v}_i) avaliados no sistema de referência inercial. Estes vetores em geral são a direção do vetor campo magnético terrestre \vec{B} , e a direção do Sol. A relação entre os vetores medidos e avaliados é dada pela transformação efetuada pela matriz de atitude A , (5).

$$A\vec{v}_i = \vec{w}_i \quad (5)$$

4.3.2.2 – CONTROLE

O Sistema de Determinação e Controle é o responsável pelo controle das velocidades angulares em torno dos eixos x , y , z do satélite e o posicionamento das antenas de modo a estabelecer um contato do satélite com a Estação Terrena.

Para haver um controle em tempo real e durante toda a vida útil do satélite é necessário a implementação de um sistema de controle em malha fechada, onde são utilizados uma central de processamento (CPU), atuadores (magneto torque, ou bobinas magnéticas), e sensores (sensor solar, giroscópio, magnetômetro). A Figura 20 representa o controle em malha fechada e as funções de transferência envolvidas o processo, como a função de transferência da planta $G_p(S)$ (atuadores magnéticos e outros elementos), $H(S)$ com a modelagem dos sensores e $G_c(S)$ com a modelagem do controle do CubeSat .

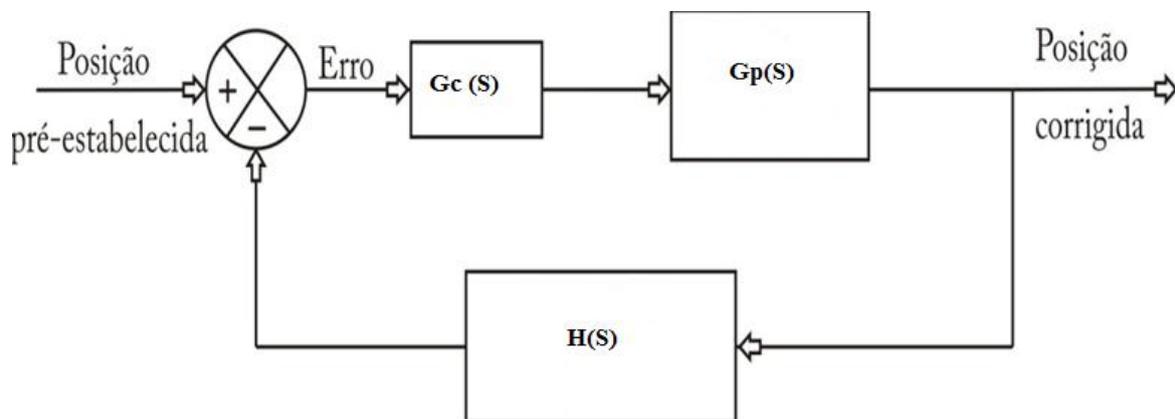


Figura 20- Diagrama de blocos do sistema de controle de malha fechada do CubeSat NANOSATC-BR1

O método de determinação de atitude adotado neste estudo é o TRIAD, que necessita de dois vetores de observação para gerar a matriz de rotação A do sistema. Estas informações são adquiridas pelo sensor solar SLCD-61N8 do fabricante Silonex, e o magnetômetro HMC5843, do fabricante Honeywell, ambos acoplados ao computador de bordo **NanoMind A712**.

Os atuadores serão 3 torqueadores magnéticos, acoplados a três painéis solares ortogonais do CubeSat, que irão provocar torques nas direções x, y, z em decorrência da interação do momento magnético gerado nas bobinas com o campo geomagnético \vec{B} . O produto vetorial entre estas grandezas faz com que o torque magnético seja perpendicular a estes dois vetores.

4.3.2.3 - ANÁLISE DE MISSÃO

Momento de Inércia do CubeSat e Parâmetros de Órbita:

Para que seja possível calcular os dois vetores \vec{v}_i necessários ao processo de determinação de atitude, deve-se inicialmente calcular a posição que o satélite encontra-se na sua órbita, a cada instante. Para isso utiliza-se de um propagador analítico de órbita a bordo, que utiliza os elementos orbitais previamente armazenados no computador para gerar a posição orbital. Estes elementos devem ser atualizados (upload) periodicamente no computador, com base nos elementos determinados pelo Norad, de dois a cinco dias. Um modelo do campo magnético terrestre deverá também ser implantado no computador de bordo, e irá fornecer o vetor campo geomagnético no sistema inercial. A posição do Sol será igualmente calculada a bordo, usando-se para isso um modelo analítico da órbita terrestre ao redor do Sol, tendo como parâmetros a data e hora do dia. Portanto, o computador deverá contar com um relógio a bordo e este relógio deverá ser ajustado periodicamente. O erro do relógio deve ser mantido abaixo de 1 minuto para assegurar precisão no cálculo do campo magnético terrestre. A órbita do CubeSat NANOSATC-BR1 deverá ser idêntica à órbita de injeção do satélite CBERS-3, já que serão lançados em conjunto. Contudo, o CBERS-3 deverá efetuar manobras orbitais visando atingir a órbita de referência, ou nominal, enquanto que o NANOSATC-BR1 deverá permanecer na órbita original. Os elementos keplerianos da órbita de injeção deverão ser armazenados previamente no computador de bordo de forma a assegurar que o controle de atitude funcione adequadamente logo após a separação como lançador. Para fins de simulação, adota-se a órbita de

injeção como sendo próxima à órbita nominal do CBERS-3, que é uma órbita hélio-síncrona congelada. A altitude média é de 630 km, excentricidade considerada nula, inclinação de 98 graus, horário de cruzamento com o equador em nodo descendente de 10:30 horas. Na verdade a excentricidade deverá ser de 0,0011 e o argumento do perigeu deverá ser -90 graus. Provavelmente estes valores serão diferentes no caso do NANOSATC-BR1.

Momento de inércia do CubeSat:

Supondo uma distribuição uniforme de massa em um cubo de lados iguais $a = 0.1$ m, como o Cubesat, tem-se que o momento de inércia é idêntico nos 3 eixos do satélite e é dado por (6).

$$I = \frac{1}{6}ml^2 \quad (6)$$

onde m representa a massa do satélite, em torno de **1kg** e l representa o comprimento das arestas do CubeSat.

Como não se tem uma distribuição perfeita de massa no satélite, e visto que ainda não se conhece os valores reais dos momentos de inércia, adotou-se nas simulações uma matriz diagonal dada por:

$$I = \frac{1}{6}ml^2 \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0,95 & 0 \\ 0 & 0 & 1,05 \end{bmatrix} \quad (7)$$

4.3.2.4 - SIMULAÇÃO E ANÁLISE DO CONTROLE DE ATITUDE DO CUBESAT

A dinâmica de atitude foi implementada em Matlab com o uso das equações de Euler para um corpo rígido, e com as relações da cinemática dada em termos de quatérnios, no pacote PROPAT [9]. Adotou-se para a atitude inicial a seqüência 60, 30 e 40 graus de seqüência x-y-z em ângulos de Euler, e velocidades angulares de 0.6, 0.3 e 0.9 rotações por minuto nos eixos x, y e z do satélite, respectivamente. O comportamento da velocidade angular nos primeiros instantes de simulação é visto na Figura 21, em função do tempo. Percebe-se neste gráfico que o satélite não se encontra estabilizado.

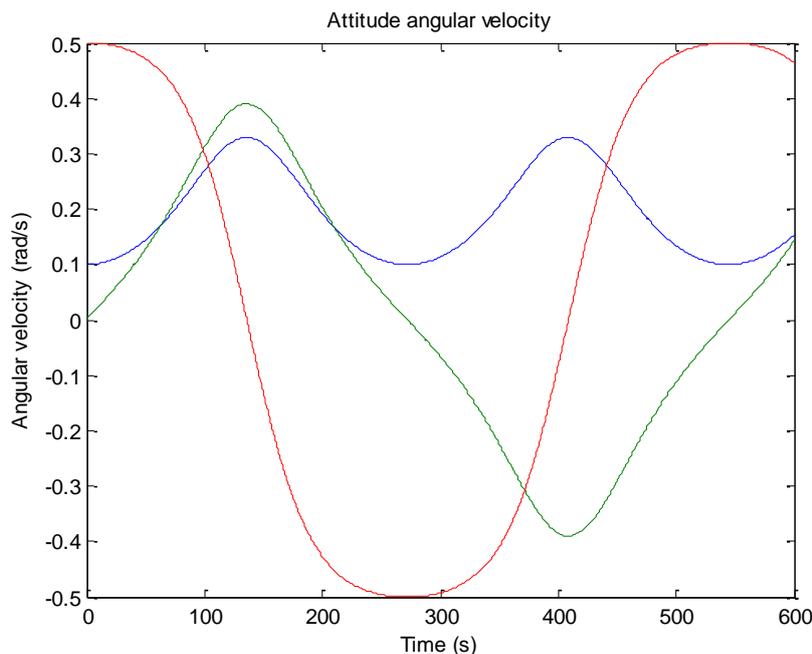


Figura 21- Gráfico com a visualização das velocidades angulares nos eixos x, y e z do CubeSat sem a aplicação de um sistema de controle

A determinação de atitude é baseada no método TRIAD, sem a inserção de ruídos nos instrumentos. Admitiu-se, neste estágio de simulação, que as velocidades angulares possam ser medidas por um giro. Como o CubeSat não

possui giro para esta medição, será necessário empregar o método de Bdot para se obter uma estimativa a bordo da velocidade angular.

Utilizou-se um controle em malha fechada Proporcional-Integral-Derivativo, onde os ganhos foram obtidos por meio de tentativa e erro, analisando-se os resultados das simulações anteriores. A referência para o controlador é uma atitude geo-apontada, isto é, com um dos eixos do satélite (x) apontado na direção da vertical, e outro eixo (y) perpendicularmente ao plano orbital. Este sistema é denominado de sistema orbital.

O erro máximo admitido no posicionamento do satélite é de 10° . Esta condição é atingida em torno de 12 horas após o lançamento do satélite, como mostra a Figura 22, que mostra o ângulo de Euler, de uma rotação em ângulo-eixo de Euler. Nesta representação, quando o ângulo de Euler é nulo os sistemas de referência coincidem.

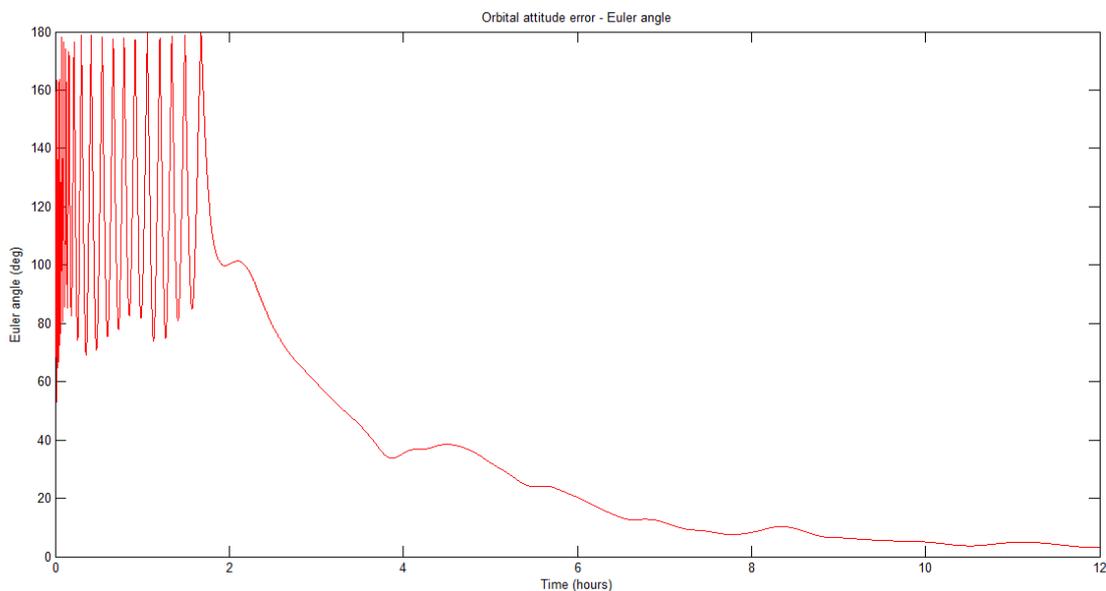


Figura 22- Gráfico representativo dos ângulos de Euler

A Figura 23 mostra a redução das velocidades angulares nas direções x, y, z e a estabilização final do satélite em sua atitude de referência.

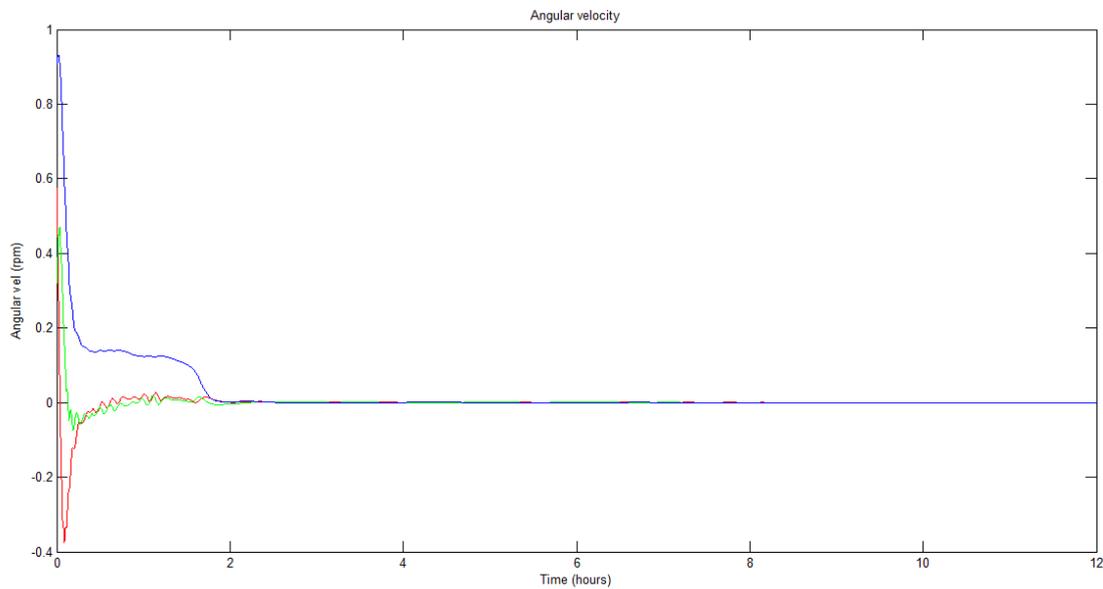


Figura 23 – Gráfico da velocidade angular do CubeSat

A partir da simulação matemática desenvolvida no software Matlab, o programa de simulação gera um arquivo de texto, no formato **.txt** que contém as informações sobre os ângulos de Euler adquiridas a cada intervalo de tempo designado. Este arquivo pode ser visualizado na Figura 24, com um intervalo entre de 10 segundos entre duas avaliações consecutivas.



Relatório Final de Atividades 2012

```

10.000000000000, 43200.00000, 263.180>, < 9.953, 21.362, -1.517>, <-182.309, 71.052, -195.669>, < 98.000, 0.000, -0.000>,
10.000, < 287.823, -34.434, 245.905>, < 9.446, 21.613, -1.614>, <-225.848, 82.164, -221.596>, < 98.000, 0.000, 0.628>,
20.000, < 248.738, 20.375, 296.124>, < 8.927, 21.858, -1.706>, <-271.413, 95.004, -202.893>, < 98.000, 0.000, 1.257>,
30.000, < 173.759, 70.455, 296.124>, < 8.927, 21.858, -1.706>, <-271.413, 95.004, -202.893>, < 98.000, 0.000, 1.257>,
40.000, < 74.715, 28.942, 14.236>, < 8.395, 22.096, -1.795>, <-288.346, 95.724, -170.238>, < 98.000, 0.000, 1.885>,
50.000, < 45.356, -30.425, 6.918>, < 7.851, 22.326, -1.878>, <-276.170, 83.434, -162.674>, < 98.000, 0.000, 2.513>,
60.000, < 312.540, -60.509, 283.673>, < 7.296, 22.549, -1.956>, <-273.075, 71.464, -194.740>, < 98.000, 0.001, 3.141>,
70.000, < 257.869, -10.038, 236.449>, < 6.730, 22.764, -2.029>, <-307.923, 70.587, -229.425>, < 98.000, 0.001, 3.770>,
80.000, < 238.678, 51.470, 232.414>, < 6.154, 22.971, -2.097>, <-356.650, 75.524, -219.381>, < 98.000, 0.001, 4.398>,
90.000, < 76.841, 64.269, 21.263>, < 5.568, 23.169, -2.159>, <-381.537, 74.493, -184.584>, < 98.000, 0.001, 5.026>,
100.000, < 59.201, 2.514, 25.658>, < 4.973, 23.359, -2.215>, <-371.061, 63.499, -163.391>, < 98.000, 0.001, 5.654>,
110.000, < 38.417, -57.741, 7.907>, < 4.369, 23.539, -2.266>, <-354.148, 48.254, -181.542>, < 98.000, 0.001, 6.282>,
120.000, < 266.067, -54.183, 234.987>, < 3.756, 23.710, -2.310>, <-365.561, 36.454, -220.279>, < 98.000, 0.001, 6.911>,
130.000, < 252.427, 5.376, 216.942>, < 3.136, 23.872, -2.348>, <-407.186, 30.232, -236.525>, < 98.000, 0.001, 7.539>,
140.000, < 261.120, 64.978, 199.958>, < 2.509, 24.023, -2.379>, <-441.661, 25.563, -207.615>, < 98.000, 0.001, 8.167>,
150.000, < 51.167, 53.383, 45.853>, < 1.875, 24.165, -2.404>, <-446.389, 17.365, -173.595>, < 98.000, 0.002, 8.795>,
160.000, < 58.727, -5.032, 35.820>, < 1.235, 24.297, -2.423>, <-426.862, 5.278, -164.723>, < 98.000, 0.002, 9.423>,
170.000, < 61.399, -62.894, 30.547>, < 0.590, 24.419, -2.435>, <-411.781, -8.750, -187.599>, < 98.000, 0.002, 10.051>,
180.000, < 247.388, -60.188, 208.054>, < -0.060, 24.530, -2.440>, <-421.454, -22.766, -218.605>, < 98.000, 0.002, 10.679>,
190.000, < 253.756, -4.696, 200.809>, < -0.713, 24.631, -2.438>, <-451.319, -35.611, -227.673>, < 98.000, 0.002, 11.307>,
200.000, < 273.455, 47.287, 182.106>, < -1.371, 24.722, -2.430>, <-473.988, -45.947, -200.025>, < 98.000, 0.002, 11.936>,
210.000, < 15.299, 62.414, 82.660>, < -2.031, 24.802, -2.415>, <-474.707, -55.439, -170.060>, < 98.000, 0.002, 12.564>,
220.000, < 54.660, 16.780, 48.074>, < -2.694, 24.872, -2.393>, <-456.283, -64.657, -158.293>, < 98.000, 0.002, 13.191>,
230.000, < 71.045, -33.045, 43.834>, < -3.359, 24.931, -2.365>, <-437.705, -75.139, -170.488>, < 98.000, 0.003, 13.819>,
240.000, < 130.173, -77.037, 88.862>, < -4.024, 24.980, -2.330>, <-432.846, -87.707, -192.714>, < 98.000, 0.003, 14.447>,
250.000, < 240.345, -45.741, 184.240>, < -4.691, 25.018, -2.288>, <-442.821, -101.931, -206.736>, < 98.000, 0.003, 15.075>,
260.000, < 260.146, -0.170, 182.480>, < -5.357, 25.046, -2.240>, <-458.238, -116.025, -201.471>, < 98.000, 0.003, 15.703>,
270.000, < 288.024, 40.397, 162.810>, < -6.023, 25.063, -2.185>, <-462.641, -126.256, -173.060>, < 98.000, 0.003, 16.331>,
280.000, < 357.762, 55.318, 100.063>, < -6.687, 25.070, -2.123>, <-453.713, -133.867, -151.666>, < 98.000, 0.003, 16.959>,
290.000, < 48.021, 26.809, 58.117>, < -7.350, 25.067, -2.055>, <-435.042, -139.403, -144.392>, < 98.000, 0.003, 17.586>,
300.000, < 71.246, -11.956, 48.155>, < -8.011, 25.054, -1.981>, <-417.452, -145.481, -151.746>, < 98.000, 0.003, 18.214>,
310.000, < 97.681, -49.894, 55.161>, < -8.669, 25.031, -1.901>, <-407.414, -153.602, -164.566>, < 98.000, 0.003, 18.842>,
320.000, < 182.077, -68.985, 123.495>, < -9.324, 24.999, -1.815>, <-404.846, -163.622, -173.776>, < 98.000, 0.004, 19.469>,
330.000, < 242.105, -41.197, 166.698>, < -9.976, 24.957, -1.723>, <-406.392, -174.477, -174.257>, < 98.000, 0.004, 20.097>,
340.000, < 265.175, -6.427, 167.981>, < -10.623, 24.905, -1.625>, <-405.963, -183.472, -157.976>, < 98.000, 0.004, 20.724>,
350.000, < 289.025, 25.444, 156.037>, < -11.266, 24.844, -1.522>, <-400.746, -190.403, -141.674>, < 98.000, 0.004, 21.352>,
360.000, < 329.516, 46.846, 124.249>, < -11.904, 24.775, -1.413>, <-388.423, -193.875, -126.944>, < 98.000, 0.004, 21.979>,
370.000, < 23.368, 43.250, 78.525>, < -12.537, 24.696, -1.298>, <-371.381, -194.847, -120.162>, < 98.000, 0.004, 22.606>,
380.000, < 57.027, 29.043, 54.045>, < -13.164, 24.609, -1.179>, <-354.460, -195.458, -122.131>, < 98.000, 0.004, 23.234>,
390.000, < 78.343, -8.497, 45.391>, < -13.785, 24.514, -1.055>, <-341.218, -197.407, -128.539>, < 98.000, 0.004, 23.861>,
400.000, < 99.490, -37.059, 47.058>, < -14.400, 24.411, -0.926>, <-332.117, -201.000, -134.195>, < 98.000, 0.004, 24.488>,
410.000, < 137.090, -60.721, 69.276>, < -15.008, 24.300, -0.792>, <-325.612, -205.540, -136.275>, < 98.000, 0.005, 25.115>,
420.000, < 208.651, -62.254, 126.783>, < -15.609, 24.181, -0.654>, <-320.017, -210.198, -134.273>, < 98.000, 0.005, 25.742>,
430.000, < 248.222, -41.140, 151.846>, < -16.202, 24.055, -0.512>, <-314.155, -214.334, -128.556>, < 98.000, 0.005, 26.369>,
440.000, < 268.507, -16.020, 155.299>, < -16.789, 23.922, -0.365>, <-305.559, -216.162, -112.594>, < 98.000, 0.005, 26.996>,
450.000, < 285.803, 8.330, 150.463>, < -17.367, 23.783, -0.215>, <-295.717, -216.872, -101.947>, < 98.000, 0.005, 27.623>,
460.000, < 306.624, 29.690, 137.999>, < -17.938, 23.636, -0.061>, <-283.587, -215.460, -92.350>, < 98.000, 0.005, 28.250>,
470.000, < 337.042, 44.326, 114.180>, < -18.501, 23.484, 0.097>, <-269.792, -212.193, -86.028>, < 98.000, 0.005, 28.877>,
480.000, < 16.155, 46.242, 80.950>, < -19.055, 23.325, 0.257>, <-255.733, -207.992, -84.016>, < 98.000, 0.005, 29.503>,
490.000, < 48.227, 35.111, 54.698>, < -19.601, 23.161, 0.421>, <-242.913, -204.023, -85.639>, < 98.000, 0.005, 30.130>,
500.000, < 69.235, 17.420, 40.085>, < -20.139, 22.991, 0.588>, <-232.232, -201.147, -88.960>, < 98.000, 0.006, 30.757>,

```

Figura 24- Arquivo de texto gerado nas simulações no Matlab

Para a melhor visualização dos fenômenos que ocorrem durante a órbita do NANOSATC-BR1 utilizou-se o programa de visualização gráfica **POV-Ray For Windows v3.62**, capaz de gerar imagens a partir dos dados adquiridos no arquivo de texto. A Figura 25 ilustra um frame do vídeo gerado durante o período necessário para a estabilização do satélite, em torno de 12 horas. Este valor seguramente será maior quando forem adicionados os ruídos às medições, a influência da sombra da Terra na determinação de atitude, e a avaliação da velocidade angular por meio de **Bdot**.

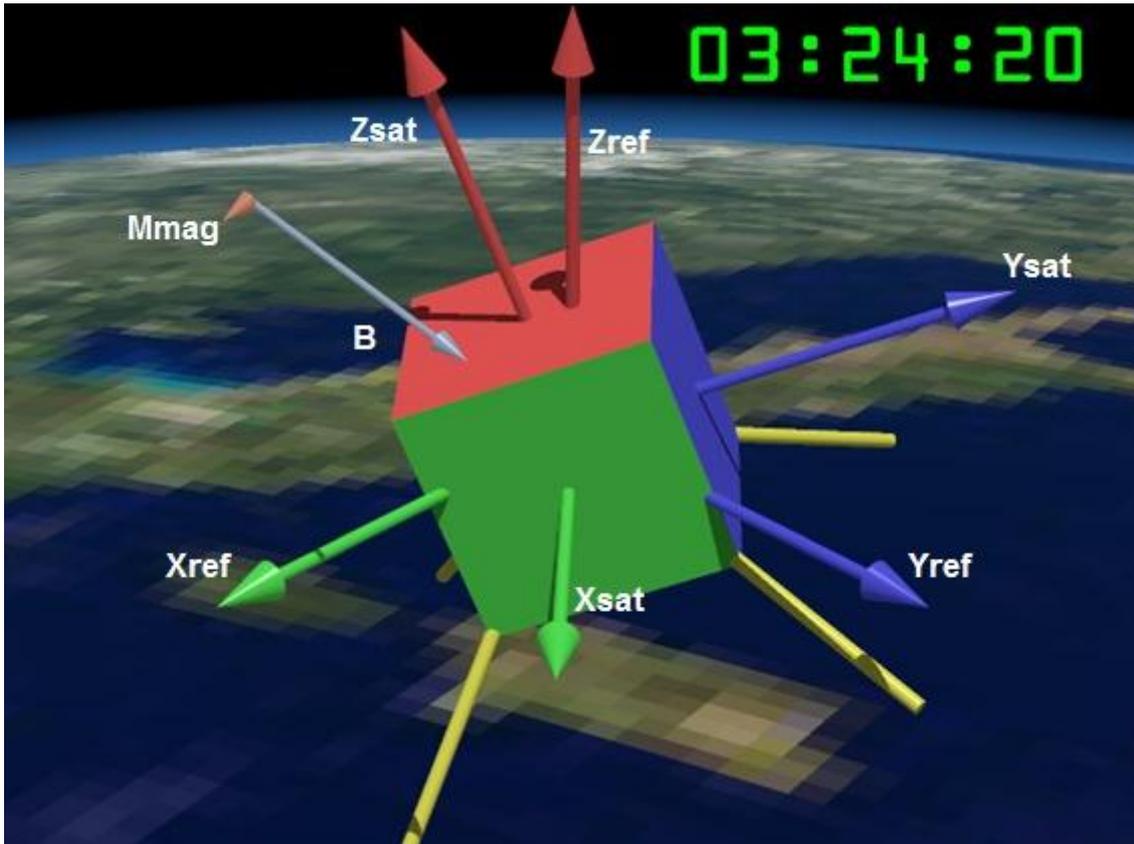


Figura 25- Figura gerada no software POV, que demonstra a posição do satélite em sua órbita espacial.

Na Figura 25 são mostrados o sistema de referência do satélite e o sistema de referência orbital. O vetor em cinza indica o vetor de campo geomagnético \vec{B} e o vetor em laranja mostra a direção e intensidade do torque gerado pelas bobinas magnéticas.



5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

O Projeto desenvolvido pelo Acadêmico Tális Piovesan obteve os resultados esperados, com o desenvolvimento de testes e estudo dos magnetômetros no Laboratório de Eletrônica do CRS/CCR/INPE-MCTI, bem como a aplicação da Magnetometria aplicada em Ciências Espaciais, com ênfase em Nanosatélites da Classe CubeSats.

O Acadêmico participará a partir de Agosto de 2012 do Programa do Governo Federal, **Ciência Sem Fronteiras** e desenvolverá um estágio técnico na empresa **Innovative Solutions in Space – ISIS**, em Delft, Holanda, que desenvolve nano satélites e tecnologias espaciais, durante o período de 40 dias, bem como, cursará um semestre letivo na Universidade **Univesità degli Studi di Roma “La Sapienza”**, em Roma, Itália. Deste modo o Acadêmico pretende adquirir especialização e conhecimentos na área das Ciências & Tecnologias Espaciais para aplica-los em seu retorno ao Brasil em projetos de pesquisa espacial que vem desenvolvendo.

6 - BIBLIOGRAFIA

- [1] CAMPBELL, W. H. ***Introduction to Geomagnetic Fields***, Cambridge University Press, New York, 1997.
- [2] PIOVESAN, T. Desenvolvimento de Instrumentação para Medidas Geomagnéticas de baixo ruído a bordo de Satélites Científicos – Magnetômetro de Núcleo Saturado. INPE, Brasil, 2011.
- [3] PIOVESAN, T. ; CARRARA, V.; SCHUCH, N. J.; DURÃO, O. S. C. ***Análise de Missão, Sistema de Determinação de Atitude e Controle Orbital***, 2012, INPE, Brasil.
- [4] GRANZIERA, F. JR.; LOPES, R. V. F.; TOSIN, M. C. ***The attitude determination problem from two reference vectors - a description of the triad algorithm and its attitude covariance matrix***. Londrina, 2007.
- [5] KUGA, H. K. ; RAO, K. R.; CARRARA, V. ***Introdução à Mecânica Orbital***. 2ª edição, São José dos Campos, 2008.
- [6] STECKEL, T. R. C. ***Estudo e Projeto de um Sistema Determinador de Atitude para Pequenos Satélites empregando sensor magnético***. UFSM, Brasil, 2010.
- [7] CHOBOTOV, V. A. ***Spacecraft Attitude Dynamics and Control***. Florida, 1991.
- [8] OGATA, K. ***Engenharia de Controle Moderno***. 5ª edição, 2011.
- [9] <http://www2.dem.inpe.br/val/>, acesso em 18/06/2012.
- [10] Datasheet do computador de bordo ***NanoMind712***.
- [11] WERTZ, R. D. ***Spacecraft Attitude Determination and Control***. D. Reidel, Dordrecht, Holanda, 1978.



[12] Boylestad, R. L. ,& Nashelsky, L. , ***Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos*** , 8^a. Edição, Prentice Hall , Pearson Education do Brasil , 2004 .