

ANÁLISE COMPARATIVA DOS DADOS DO MAGNETÔMETRO DO NANOSAC-BR1 COM DADOS DE MAGNETÔMETROS DE SOLO

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

Vitor Vaz Schultz (UFSM, Bolsista PIBIC/CNPq)
E-mail: xultezz@gmail.com

Dr. Clezio Marcos De Nardin (Embrace/INPE, Orientador)
E-mail: clezio.denardin@inpe.br

COLABORADORES

Dr. Juliano Moro (CRS/INPE)
Dr. Nelson Jorge Schuch (CRS/INPE)

Junho de 2016

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer aos meus pais, Rosângela Vaz Schultz e Sergio Schultz, que são os melhores e sempre me incentivaram a evoluir. Aos meus avôs Ivo Schultz e Bozano de Almeida Vaz os quais eu tenho a honra de seguir os conselhos. E também devo agradecer a minha namorada Laura Buss e a gurizada, que ouviram muitas vezes os assuntos tratados neste trabalho. Por último, mas não menor importante, um agradecimento ao meu orientador Dr. Clezio M. Denardini e os coorientadores Dr. Nelson Jorge Schuch e Dr. Juliano Moro, que gastaram um tempo considerável me orientando na vida pessoal e profissional. O Bolsista aproveita para agradecer ao Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica – PIBIC, e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, assim como ao Coordenador do Programa PIBIC/INPE – CNPq/MCTIC, pela oportunidade para desenvolver seu potencial acadêmico através deste Projeto de Iniciação Científica.

RESUMO

As variações no campo geomagnético podem ser causadas por eventos de origem solar. Um exemplo desses eventos são as conhecidas tempestades geomagnéticas. As variações do vetor campo geomagnético podem ser detectadas em todo planeta com instrumentos conhecidos como magnetômetros. Esses instrumentos geralmente medem três componentes, por exemplo, a componente horizontal (H), o ângulo da declinação magnética (D), e a componente vertical (Z). A partir da componente H medida por magnetômetros instalados na região equatorial, obtém-se o índice Dst que é utilizado para classificar as tempestades geomagnéticas. O presente trabalho apresenta a análise de três tempestades geomagnéticas, classificadas como intensas segundo o índice Dst, que ocorreram em 18 de Fevereiro em 2014, 17 de Março de 2015 e 22 de Junho de 2015. Os dados dos magnetômetros do Programa de Estudos e Monitoramento Brasileiro do Clima Espacial (Embrace) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE/MCTIC, e dos parâmetros do plasma do vento solar obtidos com o satélite *Advanced Composition Explorer* (ACE) são utilizados nesse estudo. Foram analisados dados dos magnetômetros instalados em São Luís do Maranhão/MA (SLZ), Eusébio/CE (EUS), Alta Floresta/MS (ALF), Cuiabá/MT (CBA), Jataí/GO (JAT), Vassouras/RJ (VSS), Cachoeira Paulista/SP (CXP), São José dos Campos/SP (SJC), São Martinho da Serra/RS (SMS) e Rio Grande (RGA), na Argentina. Os resultados mostram as variações latitudinais do módulo do campo geomagnético, e suas componentes Z e H durante as três tempestades geomagnéticas. O principal resultado desse estudo mostra que quanto maior a redução do índice Dst durante a tempestade geomagnética, maior será a redução na componente H do campo geomagnético medido pelos magnetômetros da Rede Embrace, principalmente das estações próximas da região central da Anomalia Magnética da América do Sul.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Diagrama de Hertzsprung – Russell.	4
Figura 2.2 - Camadas do Sol	6
Figura 2.3 - Ilustração do processo de convecção.....	8
Figura 2.4 - Grânulos presentes na fotosfera.....	9
Figura 2.5 - Coroa solar durante um eclipse.....	10
Figura 2.6 - Mancha solar indicando as diferentes regiões.	11
Figura 2.7 - Proeminência na superfície do Sol.....	12
Figura 2.8 - Comparação de tamanho entre uma proeminência e a Terra.....	13
Figura 2.9 - Plumes captados pelo SOHO.....	14
Figura 2.10 - Propriedades do Vento solar: respectivamente Módulo e Componente Z do Campo Magnético, Temperatura, Densidade de prótons e Velocidade durante a tempestade geomagnética de 17 de Março de 2015.	16
Figura 2.11 - Magnetosfera e as diferentes regiões.....	17
Figura 2.12 - Cinturões de Radiação de Van Allen.....	19
Figura 2.13 - Efeito de um campo magnético sob partículas no estado de plasma.	22
Figura 2.14 - Altitude em função da densidade de elétrons, contendo as diferentes regiões e camadas.	24
Figura 2.15 - Relação entre os incrementos de distância $ds = dz \cdot \sec(x)$	26
Figura 2.16 - Fases de uma tempestade geomagnética.....	29
Figura 3.1 - Ilustração da bobina de excitação envolvendo um núcleo de ferro e bobina sensora.	35
Figura 3.2 - Ciclo de histerese magnética. $B(T)$ é o campo magnético interno do núcleo, $H(A/m)$ intensidade de campo magnético aplicado e H_c é a força coercitiva.....	36
Figura 3.3 - Disposição dos magnetômetros da rede EMBRACE, com o equador magnético em vermelho.....	38
Figura 3.4 - Especificações dos magnetômetros do Programa EMBRACE.....	39

Figura 3.5 - Decomposição do vetor campo magnético terrestre nas componentes Z e H levando em conta o ângulo de declinação entre a componente H e o norte geográfico(direção x) e também o ângulo de inclinação entre o módulo F e a componente H.....	40
Figura 3.6 - Disponibilidade de dados de magnetômetros do programa Embrace para cada cidade.	41
Figura 3.7 - Exemplo de dados dos magnetômetros do programa Embrace, utilizados para a análise das tempestades.....	41
Figura 4.1 - Histograma do número de eventos registrados.	43
Figura 4.2 - Parâmetros do vento solar medidos pelo satélite ACE entre os dias 8 e 28 de Fevereiro de 2014: (a) Módulo do IMF, (b) componente Z do IMF (c) Temperatura, (d) Densidade de prótons, (e) velocidade do vento solar, e (f) índice Dst, obtido com magnetômetros.	45
Figura 4.3 - Variação do módulo do campo geomagnético seguido do índice Dst, onde está indicado as fases da tempestade geomagnética.	47
Figura 4.4 - Variação da componente Z do campo geomagnético de cada cidade.....	48
Figura 4.5 - Variação da componente H do campo geomagnético seguido do índice Dst, onde está indicado o mínimo valor atingido.....	49
Figura 4.6 - Gráfico do mínimo valor atingido na componente H do campo geomagnético versus a inclinação magnética de cada estação.	51
Figura 4.7 - Parâmetros do vento solar medidos pelo satélite ACE entre os dias 3 e 23 de Março de 2015: (a) Módulo do IMF, (b) componente Z do IMF (c) Temperatura, (d) Densidade de prótons, e (f) Índice Dst.	52
Figura 4.8 - Variação do módulo do campo geomagnético seguido do índice Dst, onde está indicado as fases da tempestade geomagnética.	54
Figura 4.9 - Variação da componente Z do campo geomagnético de cada cidade.....	55
Figura 4.10 - Variação da componente H do campo geomagnético seguido do índice Dst, onde está indicado o mínimo valor atingido.	56

Figura 4.11 - Gráfico do mínimo valor atingido na componente H do campo geomagnético versus a Inclinação média do campo geomagnético de cada cidade.....	58
Figura 4.12 - Parâmetros do vento solar medidos pelo satélite ACE entre os dias 20 e 29 de Junho de 2015: (a) Módulo do IMF, (b) componente Z do IMF (c) Temperatura, (d) Densidade de prótons, e (f) Índice Dst.	60
Figura 4.13 - Variação do módulo do campo geomagnético seguido do índice Dst, onde está indicado as fases da tempestade geomagnética.	62
Figura 4.14 - Variação da componente Z do campo geomagnético de cada cidade.....	63
Figura 4.15 - Variação da componente H do campo geomagnético seguido do índice Dst, onde está indicado o mínimo valor atingido.	64
Figura 4.16 - Gráfico do mínimo valor atingido na componente H do campo geomagnético versus a Inclinação média de cada cidade.....	65
Figura 4.17 - Histograma do valor mínimo da componente <i>H</i> de cada estação, e em cada tempestade geomagnética.	66
Figura 4.18 - Mapa da intensidade do campo geomagnético.	67
Figura 7.1 - Módulo $ F $ do campo geomagnético de cada cidade durante a tempestade geomagnética de 18 de Fevereiro de 2014.	76
Figura 7.2 - Componente Z do campo geomagnético de cada cidade durante a tempestade geomagnética de Fevereiro de 2014.	77
Figura 7.3 - Componente H do campo geomagnético de cada cidade durante a tempestade geomagnética de Fevereiro de 2014.	78
Figura 7.4 - Módulo $ F $ do campo geomagnético de cada cidade durante a tempestade geomagnética de 17 de Março de 2015.	79
Figura 7.5 - Componente Z do campo geomagnético de cada cidade durante a tempestade geomagnética de 17 de Março de 2015.	80
Figura 7.6 - Componente H do campo geomagnético de cada cidade durante a tempestade geomagnética de 17 de Março de 2015.	81
Figura 7.7 - Módulo $ F $ do campo geomagnético de cada cidade durante a tempestade geomagnética de 22 de Junho de 2015.	82

Figura 7.8 - Componente Z do campo geomagnético de cada cidade durante a tempestade geomagnética de 22 de Junho de 2015.....	83
Figura 7.9 - Componente H do campo geomagnético de cada cidade durante a tempestade geomagnética de 22 de Junho de 2015.....	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1- Propriedades do Sol.....	5
Tabela 3.1 - Tabela das coordenadas Geográficas e Magnéticas das estações de magnetômetros utilizadas.	37
Tabela 4.1 - Tabela da inclinação e mínimo valor da componente H do campo geomagnético da tempestade de 18/02/2014.....	50
Tabela 4.2 - Tabela da inclinação e mínimo valor da componente H do campo geomagnético da tempestade de 17/03/2015.....	57
Tabela 4.3 - Tabela da inclinação e mínimo valor da componente H do campo geomagnético da tempestade de 22/06/2015.....	61

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ACE	<i>Advanced Composition Explorer</i>
CRS	Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais
Embrace	Programa de Estudos e Monitoramento Brasileiro do Clima Espacial
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IMF	<i>Interplanetary Magnetic Field</i>
Dst	<i>Disturbance Storm Time</i>
CME	<i>Coronal Mass Ejection</i>
MCTIC	Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovação e Comunicações

LISTA DE SÍMBOLOS

L_{Sol}	Luminosidade do Sol
M_{Sol}	Massa do Sol
D_{Sol}	Diâmetro do Sol
ρ	Densidade do Sol
T_S	Temperatura da superfície Solar
T_C	Temperatura ao centro do Sol
B_{Sol}	Campo Magnético do Sol
R_T	Raio da Terra
σ_1	Condutividade Pedersen
σ_2	Condutividade Hall
σ_0	Condutividade Longitudinal

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO E OBJETIVOS.....	1
2	REVISÃO TEÓRICA	3
2.1	SOL	3
2.1.1	ESTRUTURA DO SOL	5
2.1.2	ATIVIDADE SOLAR	10
2.1.3	ERUPÇÕES SOLARES	14
2.1.4	VENTO SOLAR.....	15
2.2	MAGNETOSFERA TERRESTRE	17
2.3	PLASMA IONOSFÉRICO	20
2.3.1	PLASMA	20
2.3.2	IONOSFERA TERRESTRE	23
2.4	TEMPESTADES GEOMAGNÉTICAS	28
2.4.1	ÍNDICES GEOMAGNÉTICOS	30
3	INSTRUMENTAÇÃO E METODOLOGIA.....	33
3.1	MAGNETÔMETROS.....	33
3.2	REDE EMBRACE DE MAGNETÔMETROS.....	37
3.3	METODOLOGIA DE ANÁLISE DOS DADOS	39
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	43
4.1	RESULTADOS: TEMPESTADE GEOMAGNÉTICA DE 18/02/2014.....	44
4.2	RESULTADOS: TEMPESTADE GEOMAGNÉTICA DE 17/03/2015.....	52
4.3	RESULTADOS: TEMPESTADE GEOMAGNÉTICA DE 22/06/2015.....	59
4.4	DISCUSSÕES DOS RESULTADOS	66
4.5	ATIVIDADES ADICIONAIS REALIZADAS PELO BOLSISTA	68
5	CONCLUSÕES	69
6	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	73
7	ANEXOS	75
7.1	VARIAÇÕES DO CAMPO GEOMANGÉTICO OBSERVADAS NAS ESTAÇÕES	75
7.2	RESUMOS SUBMETIDOS EM CONGRESSOS	85

1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

Neste trabalho estão apresentadas as atividades desenvolvidas no período de Agosto de 2015 até Junho de 2016 referentes ao Projeto de Iniciação Científica intitulado “ANÁLISE COMPARATIVA DOS DADOS DO MAGNETÔMETRO DO NANOSATC-BR1 COM DADOS DE MAGNETÔMETROS DE SOLO”.

O Projeto tem três objetivos específicos. O primeiro deles é qualificar cientificamente o Bolsista nas áreas do desenvolvimento científico e tecnológico relacionados às Ciências Espaciais e Atmosféricas com ênfase em Geomagnetismo, inserindo-o em atividades de pesquisas científicas espaciais. O segundo objetivo é promover o contato do Bolsista com dados científicos obtidos com o magnetômetro XEN-1210 do Programa NANOSATC-BR1. O terceiro objetivo é desenvolver habilidades do Bolsista para trabalhar com os dados científicos de magnetômetros, principalmente os que compõem o Programa de Estudos e Monitoramento Brasileiro do Clima Espacial (Embrace) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE/MCTIC.

Para atingir o primeiro objetivo, o Bolsista realizou estudos teóricos iniciais sobre a Geofísica Espacial. O estudo do Sol, sua estrutura interna e atmosférica, além da sua atividade foram realizadas no primeiro momento do desenvolvimento do Projeto. Em seguida, o Bolsista realizou estudos relacionados com a Magnetosfera terrestre. Concomitantemente a essas atividades, o Bolsista iniciou atividades práticas referentes à análise dos parâmetros interplanetários durante a tempestade magnética de 11 de Setembro de 2005, com a utilização de softwares de análises de dados (por exemplo, Origin). Em seguida, o Bolsista realizou uma revisão bibliográfica sobre o campo magnético da Terra, os índices que classificam as tempestades geomagnéticas, e finalmente, a ionosfera terrestre. Consequentemente, essas atividades contribuíram para o cumprimento do primeiro objetivo do Projeto, que é qualificar cientificamente o Bolsista nas áreas do desenvolvimento científico e tecnológico relacionados às ciências espaciais e atmosféricas com ênfase em Geomagnetismo.

Após o término da revisão teórica, foram escolhidas três tempestades geomagnéticas, classificadas como intensas segundo o índice Dst, para estudar a variação latitudinal da intensidade do campo geomagnético. O Bolsista iniciou a análise das tempestades com os dados dos magnetômetros do Programa Embrace/INPE/MCTIC, que estão instalados em solo, que está diretamente relacionada com o segundo e terceiro objetivos do Projeto. No entanto, não foi possível realizar a comparação desses resultados com os dados do magnetômetro XEN-1210 do Programa NANOSATC-BR1. Por isso, as próximas atividades referentes ao Projeto estão relacionadas com a utilização de modelos empíricos e dados científicos obtidos com o magnetômetro XEN-1210 para estudar o campo geomagnético, principalmente na região brasileira que compreende a Anomalia Magnética da América do Sul.

O presente Relatório Final está estruturado da seguinte forma:

- O Capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica sobre conceitos da relação Sol – Terra relacionados à pesquisa realizada;
- O Capítulo 3 refere-se à instrumentação básica utilizada, que são os magnetômetros da Rede Embrace/INPE;
- Os resultados são apresentados no Capítulo 4, junto com as discussões sobre a variação latitudinal do campo geomagnético no Brasil observada com magnetômetros instalados em solo;
- Finalmente, o Capítulo 5 apresenta as conclusões do estudo realizado;
- As Referências Bibliográficas utilizadas estão no Capítulo 6; e
- No Capítulo 7 são anexados cópias dos resumos dos trabalhos apresentados.

2 REVISÃO TEÓRICA

O presente capítulo trata sobre os conceitos relacionados às relações entre Sol e Terra. O Sol é discutido em primeiro lugar, seguindo pela Magnetosfera terrestre, plasma ionosférico, e as tempestades geomagnéticas.

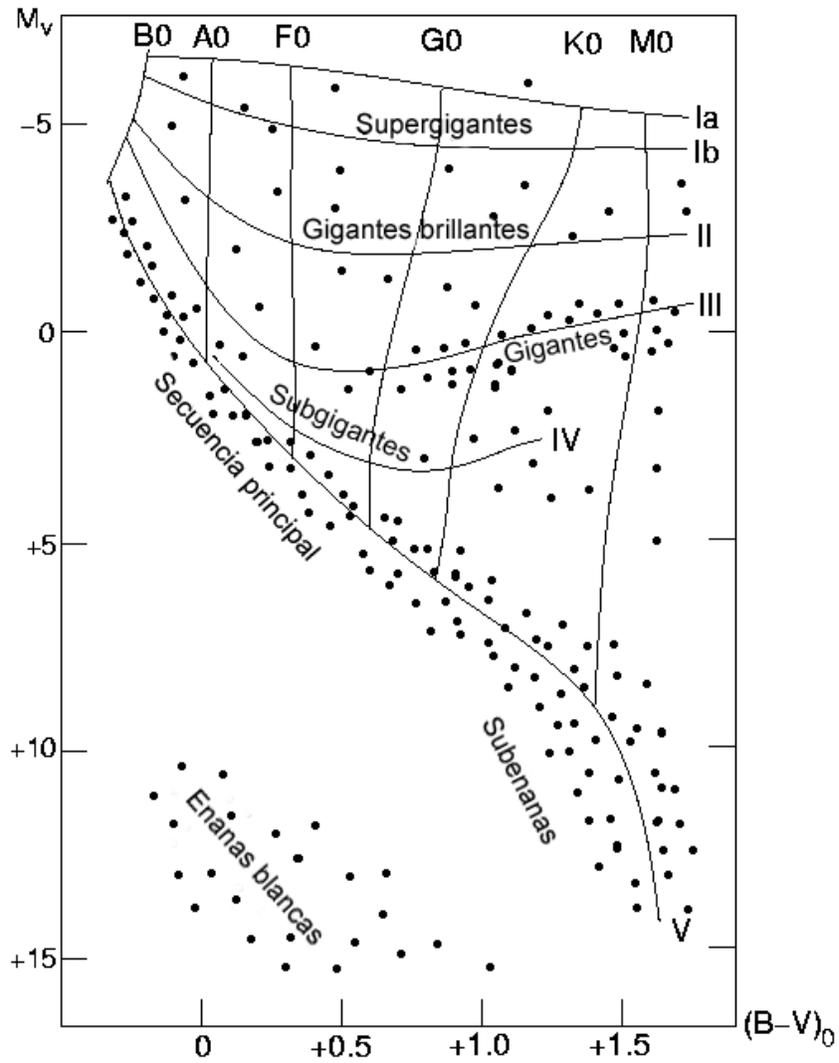
2.1 SOL

O Sol tem um diâmetro de aproximadamente 109 diâmetros terrestres e $1,98 \times 10^{30}$ kg de massa, isto é 333.000 vezes maior que a da Terra (Kivelson e Russel, 1995). Um enorme acúmulo de matéria gera um campo gravitacional tão intenso que além de manter nosso sistema solar estável, é capaz de proporcionar um ambiente mais favorável para o fenômeno de Fusão Nuclear no seu Núcleo. O Sol tem hidrogênio suficiente para os próximos 10^{10} anos.

O Sol é uma estrela de classe espectral G2 V, onde “G2” representa a temperatura da superfície, que varia de aproximadamente 5.200 K até 6.000 K. O número romano “V” indica que ele é uma estrela de sequência principal, ou seja, faz parte das estrelas que têm o hidrogênio como combustível para realizar o processo de fusão nuclear, como visto no diagrama de Hertzsprung-Russell.

O diagrama da Figura 2.1 é conhecido como diagrama de Hertzsprung-Russel, no qual o eixo vertical expressa a magnitude absoluta, e o eixo horizontal o índice B-V. Está indicado também a classe espectral das estrelas na parte superior do diagrama. O índice B-V indica a cor do astro. O Sol, de cor amarela, tem 4,8 de magnitude estelar absoluta. O índice B-V varia entre números positivos e negativos sendo representados por cores amarelas e azuis, respectivamente. Já o número 0 é representado pela cor branca.

Figura 2.1 - Diagrama de Hertzsprung – Russell.



Fonte: www.astronomy.ohio-state.edu

Atualmente, o estudo do Sol se dá através da coleta de dados por satélites. Esses dados são compostos de informações de partículas e radiações eletromagnéticas emitidas pelo Sol. O uso de satélites facilita a identificação e coleta desses dados por estarem fora da atmosfera

terrestre. Para um monitoramento do Clima Espacial, torna-se necessário o conhecimento das propriedades do Sol, suas regiões e os ciclos solares. A Tabela 1 apresenta as propriedades básicas do Sol.

Tabela 2.1- Propriedades do Sol

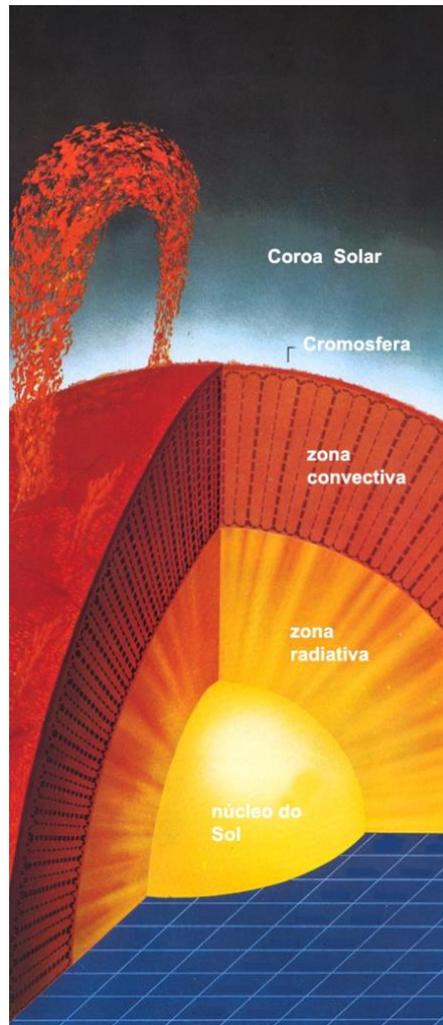
Propriedade	Valor Solar
Luminosidade	$L_{Sol} = 4 \times 10^{33} \frac{erg}{s}$
Massa	$M_{Sol} = 1,98 \times 10^{30} \text{ Kg}$
Tamanho	$D_{Sol} = 1390000 \text{ Km}$
Densidade média	$\rho = 1,4 \frac{g}{cm^3}$
Temperatura na superfície	$T_S = 5800 \text{ K}$
Temperatura central	$T_C = 15600000 \text{ K}$
Campo magnético	$B_{Sol} = 1 \text{ gauss}$

Fonte: Observatório Nacional

2.1.1 ESTRUTURA DO SOL

A estrutura interna do Sol e sua atmosfera são compostas por regiões conhecidas com propriedades diferentes, como temperatura, pressão e modo de transporte de energia. Elas são conhecidas como Núcleo, Zona Radioativa, Zona Convectiva, Cromosfera e Corona. A Figura 2.2 mostra uma ilustração dessas regiões.

Figura 2.2 - Camadas do Sol



Fonte: Observatório Nacional

O Núcleo do Sol é a região onde ocorrem as fusões nucleares. Com uma densidade de aproximadamente 115 g/cm^3 e uma temperatura de $1,57 \times 10^7 \text{ K}$, o Sol funde núcleos de Hidrogênio em seus isótopos - Deutério e Trítio - e também em Hélio. Para cada reação nuclear, cerca de $0,42 \text{ MeV}$ de energia é liberado. A região do núcleo ocupa aproximadamente 25 % do raio solar (Cruz et al., 1989).

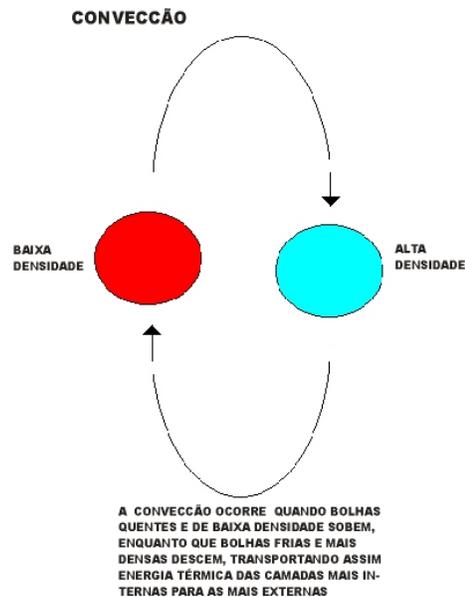
A Zona Radiativa é a região do Sol onde as trocas de energias acontecem principalmente na forma de irradiação. Ela é uma região capaz de reter os raios gama que são frutos das reações nucleares do núcleo do Sol. É uma grande parte do Sol que se estende de 25 % até 85 % do raio solar, com uma densidade que pode variar de 2 g/cm³ até 20 g/cm³, e uma temperatura entre 2 x 10⁶ K e 7 x 10⁶ K.

Na Zona Convectiva, a convecção é o tipo de troca de energia que predomina nessa porção do raio solar. Com uma temperatura de aproximadamente 2,2 x 10⁶ K, torna-se veloz o movimento de convecção e assim possibilitando um maior fluxo de energia vindas do Núcleo.

Os Grânulos na Fotosfera solar são consequência do movimento da Zona convectiva. O movimento de convecção trata-se de uma organização das moléculas onde as mais frias, ou mais densas, vão para a região de maior densidade e as mais quentes, ou menos densas, para regiões de menores densidades. Esse movimento da organização molecular está ilustrado na Figura 2.3.

Esse processo acelera a troca de energias da Zona Radiativa até a Cromosfera. Como um exemplo, pode-se observar o movimento de convecção na atmosfera da Terra. O movimento de convecção das nuvens gera colisões entre os átomos e moléculas, quando uma nuvem é muito grande mais números de colisões entre as moléculas acontece, pois possui mais matéria. O efeito é uma diferença de potencial entre a parte superior e inferior da nuvem, o qual resulta numa descarga elétrica. Essa convecção no Sol gera regiões de campo magnético intenso e correntes em uma dinâmica volátil e instável que vão determinar os Grânulos na Fotosfera.

Figura 2.3 - Ilustração do processo de convecção.

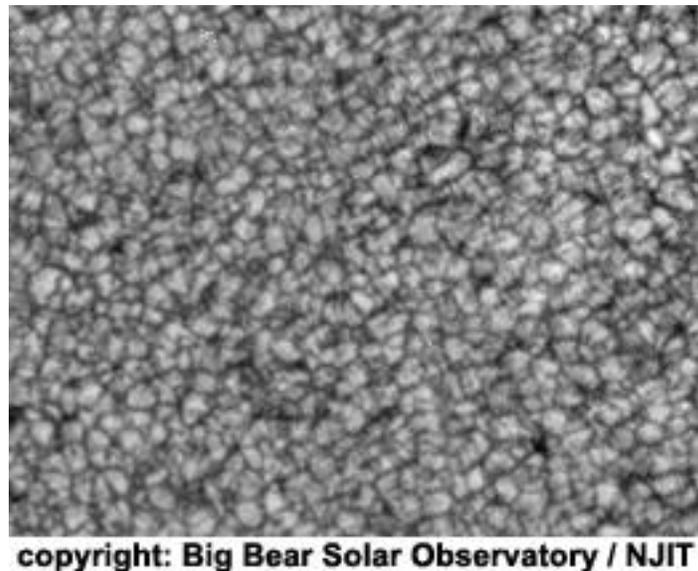


Fonte: UFRGS

A maior parte da radiação que vem do Sol vem da Fotosfera. Também conhecida como “disco solar”, a Fotosfera contribui com a maior parte da luz recebida na Terra. Ela é uma camada fina de aproximadamente 550 km de espessura. Possui uma região totalmente opaca de 400 km, até o topo da superfície. A temperatura varia de 6.000 K no início da Fotosfera, e decai até aproximadamente 4.300 K na superfície superior. É na Fotosfera que aparecem as “Manchas solares”. A superfície predominante é coberta por grânulos, como mostrado na Figura 2.4.

Os Grânulos são as regiões circulares mais claras delimitadas por uma região mais escura de menor temperatura. Com um diâmetro de aproximadamente 1.000 km, os Grânulos cobrem toda a Fotosfera, exceto quando ocorrem manchas solares.

Figura 2.4 - Grânulos presentes na fotosfera.

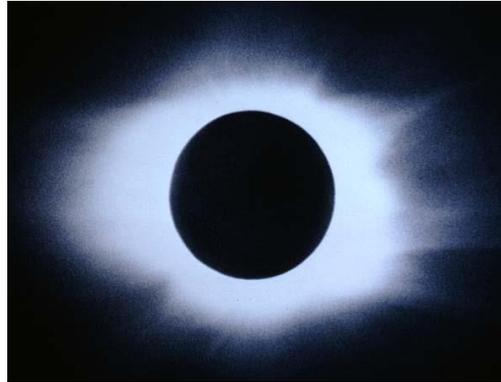


Fonte: Observatório Nacional

Uma camada do Sol relativamente pequena logo acima da Fotosfera é a Cromosfera, que possui uma espessura geométrica de 10.000 km, e onde ocorrem as “Erupções solares” (*flares*) e “Proeminências”. Na Cromosfera, à medida que se aumenta a altitude, a temperatura cinética aumenta de 5.000 K para 400.000 K. Esse aumento ocorre, pois a densidade começa a diminuir dando espaço para movimentação molecular e expansão dinâmica que aumenta muito a temperatura (Balmaceda, 2003).

A Corona, ou Coroa solar, pode ser vista a olho nu durante um eclipse, no qual a lua serve como um bloqueador da luz emitida pela Fotosfera e Cromosfera, assim restando somente à parcela da Coroa solar ilustrado na Figura 2.5. A Corona solar é a região mais externa e extensa do Sol. A temperatura da Corona atinge o valor máximo de 2×10^6 K a uma altitude aproximadamente de 50.000 km. A densidade é de apenas aproximadamente 10 íons por centímetro cúbico. Localiza-se logo acima da Cromosfera e o seu movimento de difusão pelo espaço é chamado “Vento solar” (EAD - Astrofísica Geral).

Figura 2.5 - Coroa solar durante um eclipse.



Fonte: www.if.ufrgs.br

2.1.2 ATIVIDADE SOLAR

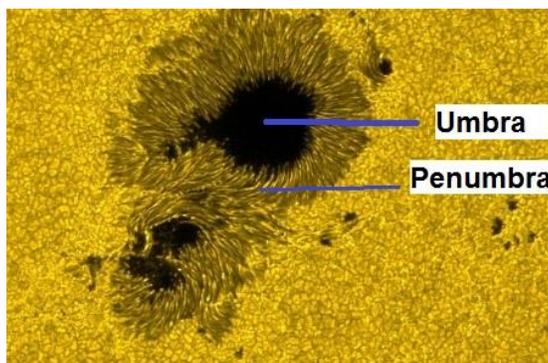
Atualmente, a atividade solar é monitorada com o objetivo de prever qualquer possibilidade de danificar ou causar grandes interferências em equipamentos que orbitam a Terra. Dentre eles os instrumentos que comandam os sistemas de posicionamento global (*Global Positioning System – GPS*) podem sofrer interferências ao passar pela ionosfera (Seção 2.3.2) a qual é mutável frente a eventos solares. Um exemplo pode ilustrar a importância de se fazer previsões sobre Clima Espacial. As estações de extração de petróleo no mar ficam flutuando e são mantidas no mesmo lugar por barcos de reboque ligados a GPS que possibilita fixar a estação de extração no mesmo lugar. Uma interferência poderia descoordenar os barcos e assim romper o cano pelo qual o petróleo sobe causando um enorme acidente.

Tendo essas preocupações em mente, os eventos que serão citados a seguir são: Manchas solares, Proeminências, Plumes, *Flares* e Vento solar. Pode-se também observar o Sol como um todo, percebendo uma grande reação em cadeia delimitada pelos eventos citados

acima. Sendo que todos os eventos são consequências das fusões nucleares no Núcleo do Sol.

As manchas solares são fenômenos temporários na Fotosfera do Sol. Trata-se de regiões que possuem um campo magnético muito forte, capaz de inibir a convecção. As manchas solares aparecem em pares e, portanto, surgem duas manchas com campos opostos, conforme a Figura 2.6. O campo gerado nessa área bloqueia o movimento de convecção e diminui a temperatura de cerca de 4.000 K, enquanto que o restante da superfície permanece com 5.500 K. Podem-se distinguir duas diferentes regiões em uma mancha solar, Umbra e Penumbra, como mostradas na Figura 2.6.

Figura 2.6 - Mancha solar indicando as diferentes regiões.



Fonte: Modificado de cienciasetecnologia.com

A Umbra é a região do centro da mancha solar, onde o Campo Magnético é de aproximadamente 3.500 Gauss. Nessa região, o campo é perpendicular à superfície do Sol. A região da Penumbra é da ordem de 50 Gauss, e essa região é uma área de transição. O campo magnético é inclinado em relação à superfície, e a componente horizontal do campo é maior. Para melhor compreender a intensidade desse campo, pode-se comparar esses valores com campos magnéticos na ordem de 1 Gauss no restante da superfície solar.

A polaridade magnética de uma única mancha pode ser Norte ou Sul, sendo um fenômeno básico a tendência de as manchas constituírem pares, tendo seus elementos com polaridades opostas. Localizados aproximadamente na mesma latitude solar e separados em longitude (cerca de 10°). As manchas isoladas, aparentemente unipolares, são sempre acompanhadas por pequenas placas, indicando a presença de uma mancha “submersa”, ainda não totalmente desenvolvida, que provavelmente seria a outra componente do par bipolar (Amarante, 1967).

Ainda no Sol, existem filamentos que aparecem escuros na superfície solar, e são devidos à absorção de luz por correntes de plasma solar que ficam suspensos pelos campos magnéticos, como ilustrado na Figura 2.7.

Figura 2.7 - Proeminência na superfície do Sol.



Fonte: telescopiourbano.blogspot.com.br

Quando um filamento se projeta para fora do limbo do Sol, ele é chamado de Proeminência. Ela consiste de uma enorme nuvem de plasma densa que fica suspensa na Coroa solar por um curto período de tempo. Entretanto, ela pode escapar da atmosfera do Sol e eventualmente atingir o planeta Terra. Como referência do tamanho de uma Proeminência, é ilustrada na Figura 2.8 uma delas fotografada pelo satélite *Solar Heliospheric Observatory* (SOHO) em 24 de Julho de 1999, em comparação com o tamanho da Terra.

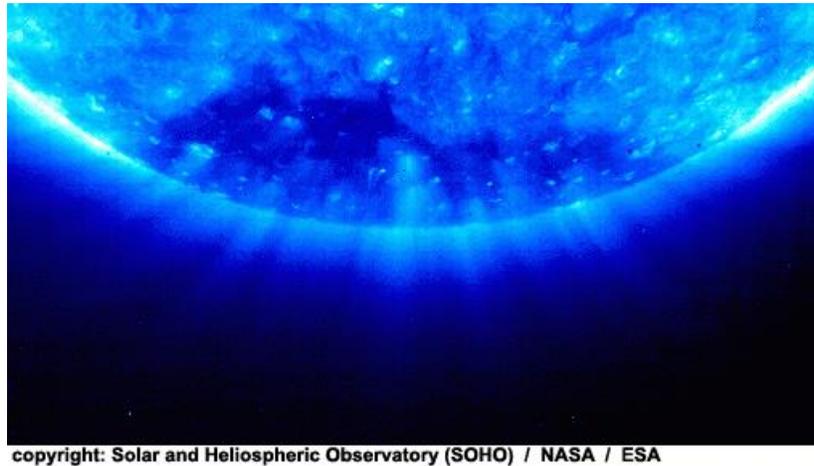
Figura 2.8 - Comparação de tamanho entre uma proeminência e a Terra.



Fonte: Observatório Nacional

Outro fato observado são os Plumes, podendo ser uma das fontes do “Vento Solar”. Os Plumes são parecidos com “plumas” de gás quente que se lançam na superfície para a atmosfera do Sol. Não se sabe ao certo como é a relação entre o campo magnético solar e os Plumes. Os Plumes são essas “linhas” que aparecem divergindo do centro do Sol, como mostrado na Figura 2.9.

Figura 2.9 - Plumes captados pelo SOHO.



Fonte: *Solar and Heliospheric Observatory (SOHO)*

2.1.3 ERUPÇÕES SOLARES

Durante o período perturbado, o número de erupções solares é maior. Essas erupções, na luz de H-Balmer-alfa (6562.8 Angstrom), ela aparece como um repentino aumento de brilho próximo a uma mancha. Durante a fase “explosiva” inicial ela se expande rapidamente paralelo à superfície solar, e mais lentamente para cima. Uma erupção totalmente desenvolvida aparece como uma camada quiescente de gás brilhante, estendendo-se desde a Fotosfera superior através da Cromosfera, até a Corona inferior.

A rápida fase “explosiva” da erupção solar segue-se um período de lento declínio. Para explicar a recorrência de 27 dias de certas categorias de tempestades magnéticas na Terra, inferiu-se a existência de regiões “magneticamente ativas” no Sol. Essas regiões seriam as fontes das partículas que provocariam distúrbios na ionosfera, em altas, médias e baixas latitudes (Amarante, 1967).

2.1.4 VENTO SOLAR

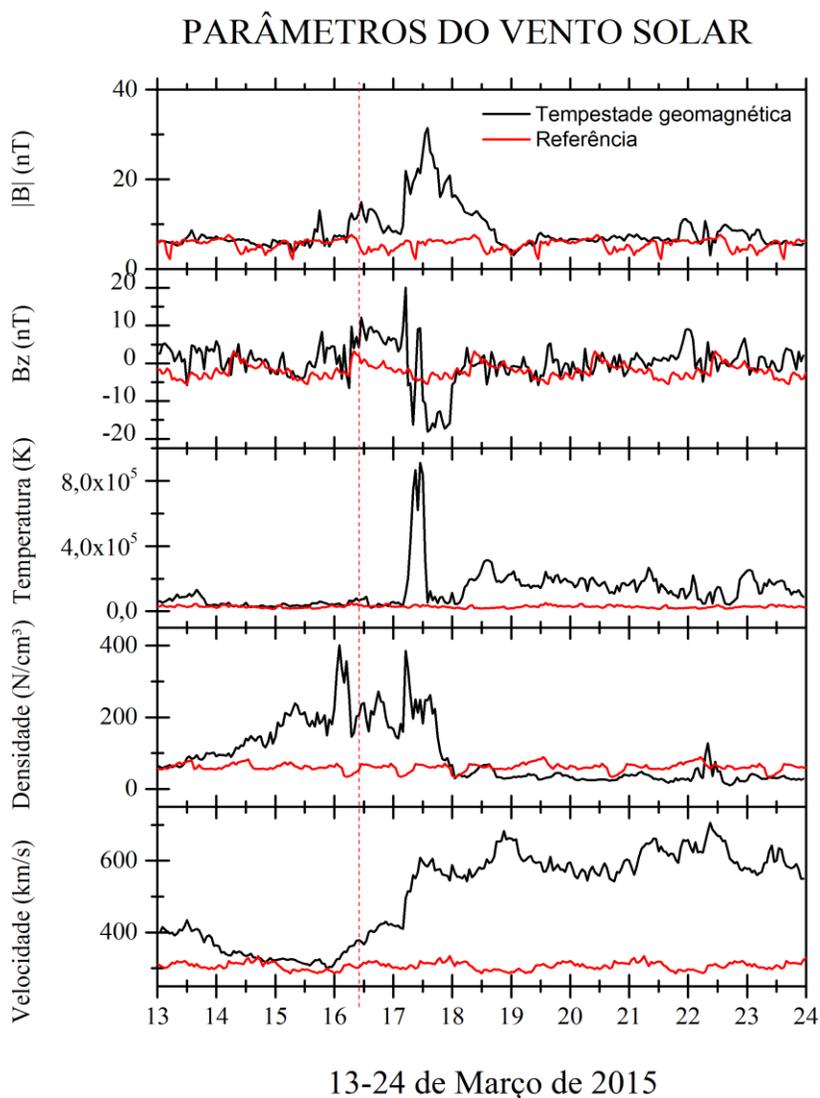
O vento solar é um fluxo de partículas ionizadas, predominantemente núcleos de hélio ionizados e elétrons (Kivelson e Russel, 1995; Costa Jr. et al., 2011). O vento solar origina-se na Corona, quando os gases possuem temperatura cinética muito elevada e escapam da gravidade solar. A uma distância de 1 Unidade Astronômica (150×10^6 km) a partir do Sol, o vento solar tem uma velocidade típica de ~ 440 km/s e uma densidade de ~ 7 partículas/cm³. Este fluxo de partículas exerce uma pressão de 2 nPa na Magnetosfera terrestre.

O plasma que flui continuamente da Coroa solar carrega consigo um “campo congelado”. Com uma densidade muito pequena e uma energia muito grande, as interações entre as partículas durante o percurso até a Terra não ocorrem. As forças iônicas que definem o plasma criam um campo para cada partícula repelindo as outras partículas, e assim se mantendo até chegar à Terra. Esse campo do plasma tem intensidade de ~ 5 nT e afeta o campo magnético da Terra (Balmaceda, 2003). Num plasma, as interações de longo alcance geradas pelos campos magnéticos fazem com que os movimentos de partículas distantes sejam correlacionados. Sendo assim, não há interação interna no vento solar.

Além dos satélites SDO e SOHO apresentados nas seções anteriores, que mostram fotos do Sol, o satélite *Advanced Composition Explorer* (ACE) também é utilizado para se obter os parâmetros do vento solar. A Figura 2.10 mostra a evolução temporal de tais parâmetros entre os dias 11 e 31 de Março de 2015, caracterizado por uma tempestade magnética que iniciou no dia 17 de Março. De cima para baixo, a figura mostra em preto o módulo do campo magnético interplanetário ($|B|$), seguido da sua componente B_z , depois a temperatura, a densidade de prótons/cm³, e finalmente a sua velocidade. Em vermelho, os mesmos parâmetros para um dia geomagneticamente calmo escolhido como referencia. É visível a alteração em todas as propriedades do vento solar durante a tempestade geomagnética, em relação ao dia de referencia. No entanto, para o completo entendimento e

classificação das tempestades geomagnéticas, as mesmas são discutidas na Seção 2.4, após a magnetosfera e ionosfera serem abordadas.

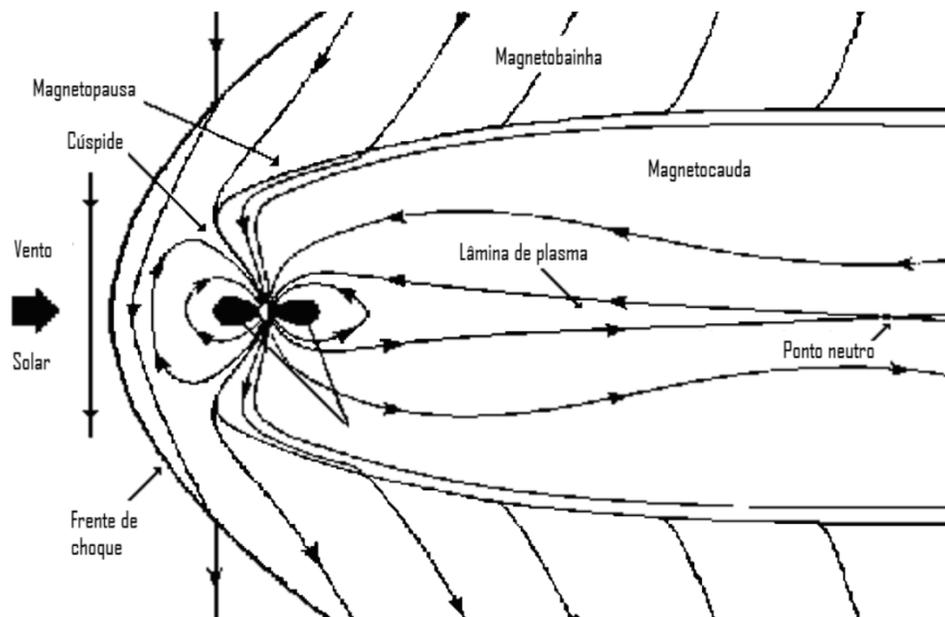
Figura 2.10 - Propriedades do Vento solar: respectivamente Módulo e Componente Z do Campo Magnético, Temperatura, Densidade de prótons e Velocidade durante a tempestade geomagnética de 17 de Março de 2015.



2.2 MAGNETOSFERA TERRESTRE

A Magnetosfera é a região em que o campo geomagnético domina os processos em relação ao vento solar (Costa J. et al., 2011). O campo geomagnético tem origem principal no núcleo da Terra, que possui um dipolo de momento magnético igual a $8 \times 10^{15} \text{ Tm}^3$. Esse dipolo é gerado no núcleo externo, onde se encontram metais líquidos. E nesse ambiente que ocorre diferenças de potenciais e toda uma dinâmica de correntes que geram o campo magnético da Terra. As equações que relacionam esses fatos são conhecidas como Leis de Maxwell. A Figura 2.11 mostra um esquema que apresenta as principais regiões da magnetosfera terrestre.

Figura 2.11 - Magnetosfera e as diferentes regiões.



Fonte: <http://www.ccvalg.pt/>

Da esquerda para à direita, observa-se a incidência do vento solar. O vento solar viaja a velocidades maiores que a velocidade característica do meio, o que da origem a uma frente de choque quando as partículas se aproximam do campo geomagnético. Para ilustrar essa ideia, pode-se pensar em um jato que voe mais rápido do que a velocidade da propagação do som que é 1.235 km/h. Desse modo acontece um acúmulo de energia em ondas sobrepostas, sendo chamado de frente de choque. A região entre o choque e a Magnetopausa apresenta propriedades diferentes das propriedades de ambos o vento solar e a magnetosfera, sendo chamada de bainha magnética e caracterizada por forte turbulência (Costa J. et al., 2011).

A Magnetopausa é a região onde o vento solar não consegue penetrar diretamente, e é desviado. O plasma desviado contorna a Magnetopausa, espiralando em torno das linhas de campo geomagnético. Nessa região, o vento solar é desacelerado, aquecido, e defletido ao redor da Terra. Entretanto, nas cúspides polares situados nos pólos magnéticos é facilitada a penetração de partículas carregadas, porque nas cúspides o campo geomagnético é vertical em relação ao horizonte.

Adentrando a Magnetopausa, o campo magnético apresenta uma mudança abrupta. De acordo com a lei de Ampere ($\oint \vec{B} dl = \mu_0 i$), uma camada de correntes elétricas deve fluir no plasma dessa interface.

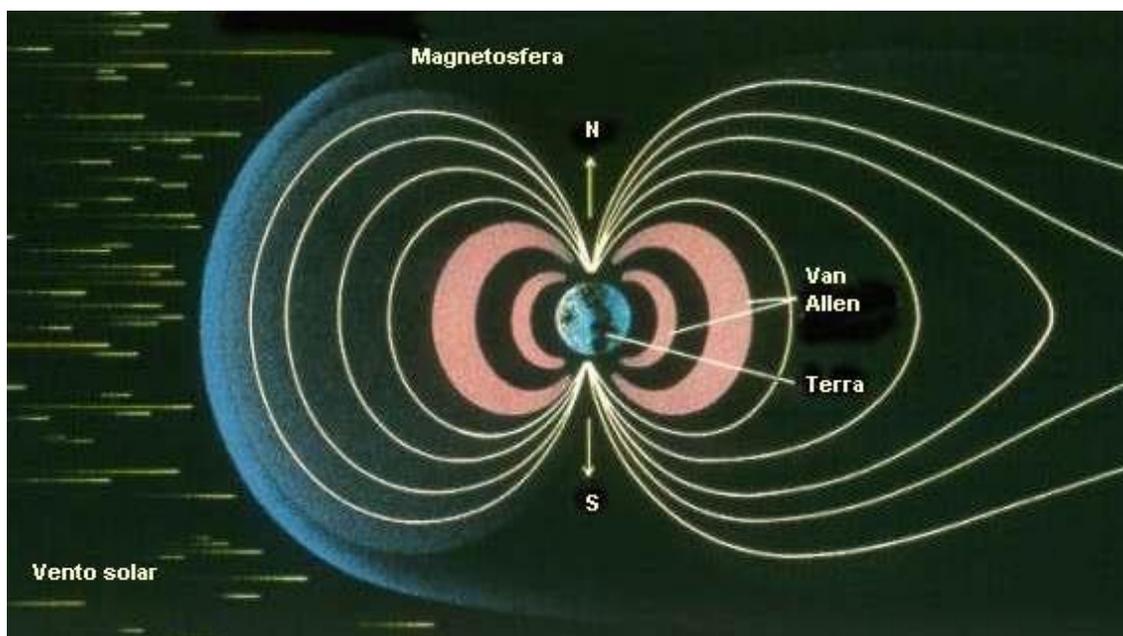
Após a frente de choque, o fluxo do vento solar é desacelerado, comprimido e aquecido, formando uma camada de plasma turbulento fora da Magnetopausa chamada bainha magnética de plasma (em inglês *Magnetosheath*) (Balmaceda, 2003).

Variações do campo magnético, observadas ao nível do solo, são produzidas primariamente por correntes elétricas que fluem bem acima da Terra. Modelos baseados em tal hipótese sugerem a existência de uma fonte distante para as variações magnéticas, possivelmente um anel de corrente envolvendo a Terra e localizado bem alto na exosfera (acima de 500 km). Esta corrente elétrica é conhecida como Corrente Anelar, e será discutida na Seção 2.4.

Embora a maior parte do vento solar seja desviada da Terra pela Magnetosfera, alguma porção do plasma pode ficar presa ao campo geomagnético. Tal fato ocasiona um aumento na densidade de partículas energéticas no interior da cavidade geomagnética, as quais se encontram nas regiões dos cinturões de Van Allen, enquanto outras menos energéticas se direcionam para as regiões polares. A Figura 2.12 ilustra os cinturões de Van Allen.

A Magnetosfera estende-se a uma distância de 10 raios terrestres no lado diurno. O lado noturno se estende a distâncias maiores de modo que ganha o nome de cauda magnética. Atravessando a magnetopausa, o campo magnético apresenta uma mudança abrupta. De acordo com a lei de Ampère, uma camada de correntes elétricas deve fluir no plasma dessa interface.

Figura 2.12 - Cinturões de Radiação de Van Allen.



Fonte: www.geocities.ws

Os cinturões de radiação de Van Allen são duas faixas que circundam a Terra nas baixas latitudes, e onde estão presentes elétrons e prótons com altas energias. O cinturão interno é constituído principalmente por prótons com energias entre 1 e 700 MeV, com um máximo de fluxo numa distancia de $1,5 R_T$ (Raio da Terra), e tem a característica peculiar de não variar muito com o tempo. No cinturão externo, a maior parte do fluxo de energia ocorre por volta dos $3,5 R_T$ havendo um decréscimo na energia das partículas à proporção que aumenta a distância da Terra (Amarante, 1967).

2.3 PLASMA IONOSFÉRICO

2.3.1 PLASMA

Os átomos existentes na natureza possuem carga elétrica total nula, ou seja, a carga elétrica positiva total dos prótons que formam o núcleo atômico é igual a carga elétrica negativa total dos elétrons presentes na nuvem eletrônica.

Íons são criados na atmosfera terrestre quando a energia emitida pelo Sol atinge um átomo, e é absorvida por alguns de seus elétrons. Se a energia final do elétron ultrapassa um determinado valor, esse elétron se desprende da interação com o núcleo do átomo. Então, os elétrons são chamados de elétrons livres e o restante do átomo, agora com carga total positiva, é chamado de íon positivo. A esse processo dá-se o nome de ionização.

Um plasma se caracteriza por ser um gás altamente ionizado, quase neutro e não se encontrar em equilíbrio térmico. A quase neutralidade se refere ao fato de que, embora a soma das cargas negativas e positivas do átomo seja praticamente nula, existem regiões onde se podem ter acúmulos significativos de cargas formando zonas não neutras (Bittencourt, 1995). As regiões onde isso ocorre têm dimensões pequenas em comparação com as dimensões totais do plasma, entretanto o acúmulo de cargas vai afetar as colisões entre íons e elétrons, pois cria pontos de atração e/ou repulsão, e estabelece campos de

força. Deste modo, o movimento de uma partícula se modificará apenas por choques com contato direto, e podem ainda sentir os efeitos de partículas relativamente distantes através dos campos de força.

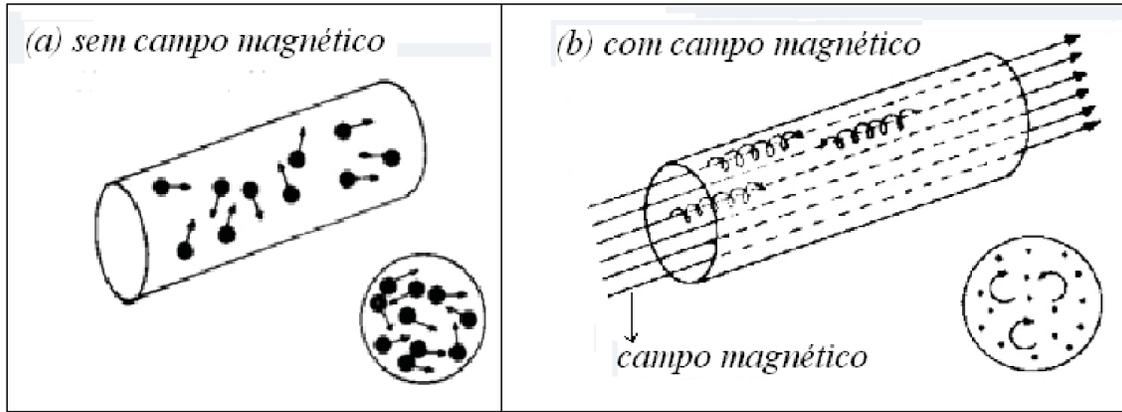
O plasma é capaz de armazenar energia como se fosse um capacitor. O vento solar possui, em um período não perturbado, uma densidade de partículas de apenas sete partículas por centímetro cúbico, entretanto essas partículas possuem altas energias que em contato com o campo geomagnético cria toda a Magnetosfera e suas correntes internas, como discutido na Seção 2.2.

A quase neutralidade pode gerar movimentos coletivos, quando um número grande de íons se separa de um número grande de elétrons. Nesse caso a força de atração tenta restaurar a neutralidade, e as cargas se aproximam e se afastam em um movimento oscilatório. A aplicação de campos externos pode também gerar movimentos coletivos como correntes ou mesmo ondas (Cruz et al., 1989).

Por fim, o plasma não está em equilíbrio térmico, pois armazenou tanta energia que o átomo agora se comporta como um dipolo, caso colida e volte a ser um gás, a energia antes armazenada é liberada. A Figura 2.13 mostra como um plasma se comporta quando imerso em um campo magnético tal como o campo geomagnético.

A frequência com que o plasma gira em torno de uma linha de campo é chamada de frequência ciclotrônica, e é o que ocorre quando o plasma do vento solar encontra linhas do campo Geomagnético.

Figura 2.13 - Efeito de um campo magnético sob partículas no estado de plasma.



Fonte: Cruz F. et al., 1989.

2.3.2 IONOSFERA TERRESTRE

A ionosfera é definida como sendo a região da atmosfera superior onde elétrons e íons positivos existem em quantidades suficientes para influenciar a propagação de ondas de rádio (Rishbeth e Garriott, 1969; Kelley 1989; Hargreaves 1992). Ela é uma das camadas mais altas da atmosfera da Terra, e abrange a termosfera. A ionosfera começa à cerca de 70-80 km de altura, e se estende até cerca de 2.000 km. Predominam principalmente os gases nitrogênio (N_2), oxigênio (O_2), e também átomo de oxigênio (O). A ionização é causada pela radiação proveniente do Sol, ou seja, a ionosfera é uma camada de plasma do elemento presente.

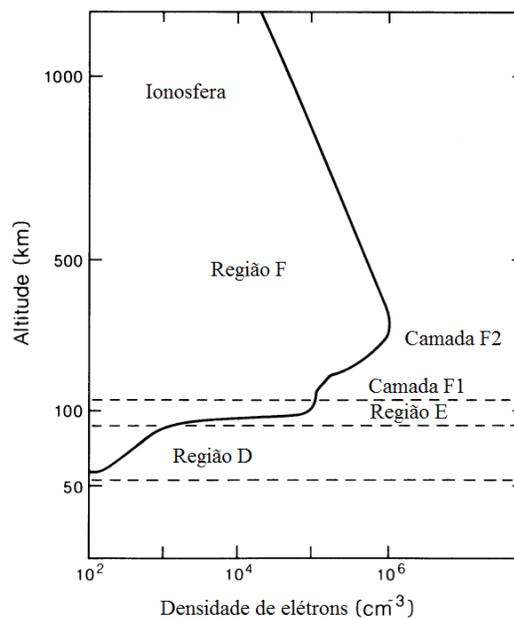
O limite inferior da ionosfera terrestre é a região onde a ionização é produzida pelas radiações com comprimentos de ondas maiores, geralmente raios cósmicos. No limite superior os íons são produzidos pelo plasma que continuamente flui do Sol com velocidade supersônica que interagem com o campo magnético da Terra (Bittencourt, 1995).

A Figura 2.14 apresenta o gráfico da altura pela densidade de elétrons, contendo as regiões D, E e F da ionosfera. A uma altura de aproximadamente 50 km, a densidade de elétrons chega aos 10^2 cm^{-3} , e aumenta linearmente até aproximadamente 90 km, onde começa a região E, na qual a densidade aumenta exponencialmente até o início da região F, aproximadamente 150 km de altura. Neste perfil é possível identificar um pico de densidade em torno de 300 km de altura, conhecido como pico da região F. A altura da máxima densidade eletrônica, ou seja, o pico da região F, depende da latitude, do nível de atividade solar, da hora local, entre outras variáveis (Kivelson e Russel, 1995).

Nas alturas mais baixas da ionosfera, contém alguns íons negativos, e nas médias alturas há uma parte eletricamente neutra que possui em suma a mesma quantidade de íons negativos e positivos. A ionosfera desempenha um importante papel na eletricidade atmosférica e forma a parte mais interna da magnetosfera terrestre. O termo ionosfera (*ionosphere*) foi dado por Watson-Watt (1929), e tornou-se de uso comum para a camada ionizada da

atmosfera terrestre. Desde essa época, a ionosfera vem sendo objeto de estudo, no qual se busca entender os processos químicos e físicos que norteiam essa camada extensa da atmosfera terrestre (Hargreaves, 1992).

Figura 2.14 - Altitude em função da densidade de elétrons, contendo as diferentes regiões e camadas.



Fonte: Adaptada de Kivelson e Russel, 1995.

De baixo para cima do perfil vertical da densidade eletrônica mostrada na Figura 2.14, a região D consiste em um plasma fracamente ionizado com uma grande densidade de partículas neutras. Nessa região ocorre um grande número de reações complexas entre os íons e essas partes neutras da atmosfera. A frequência de colisão dos elétrons é várias ordens de grandeza maior do que a frequência ciclotrônica, tanto para os elétrons como

para os íons, de modo que a presença do campo magnético terrestre é irrelevante nesta região. Esta região desaparece durante a noite.

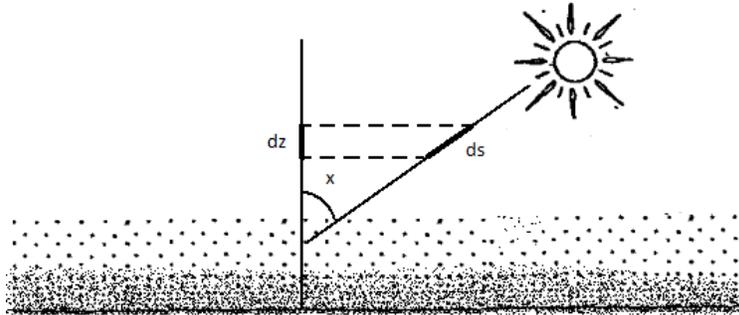
A região *E* da ionosfera está localizada entre 90 e 150 km de altitude e é caracterizada por apresentar uma forte corrente elétrica dirigida para leste durante o dia ao longo do equador magnético conhecida como Eletrojato equatorial. Esse sistema de correntes existe porque a condutividade nessa região é bastante elevada e contém principalmente íons de NO^+ , O_2^+ .

A região *F* é a região acima dos 150 km de altitude e abrange as camadas *F1*, *F2* e *F3*. A camada *F1* é a primeira, entre aproximadamente 150 e 200 km. Nesta camada predomina íons de NO^+ nas porções mais baixas e íons de O^+ nas porções mais elevadas. A camada *F2* estende-se até aproximadamente 200 km a partir da camada *F1* e nessa camada a densidade eletrônica cresce com a altura até um pico localizado entre 300 e 450 km. A camada *F3* é observada ocasionalmente, ela inicia nas primeiras horas da manhã e está localizada acima do pico da camada *F2* (Moro, 2015).

A atmosfera superior absorve parte da radiação solar numa faixa considerável de comprimentos de onda de 1 Angstrom até mais de 10 cm. Partes diferentes do espectro são absorvidas, espalhadas ou refletidas por vários processos diferentes. As estações de rádio utilizam a ionosfera para propagar suas ondas à lugares mais distantes, pois a ionosfera reflete as ondas (até aproximadamente 30 MHz) de Amplitude Modulada (AM) (EAD - Astrofísica Geral).

Examina-se inicialmente uma situação idealizada bastante simples, ilustrada na Figura 2.15, de fotoionização por radiação monocromática numa atmosfera horizontalmente estratificada, com apenas uma espécie de átomo. A descrição matemática é dada baseada no texto de Bittencourt (1978).

Figura 2.15 - Relação entre os incrementos de distância $ds = dz \cdot \sec(x)$.



Fonte: Modificada de Bittencourt (1978).

Seja $\phi(z, \lambda)$ a intensidade da radiação solar de comprimento de onda λ numa altura z da atmosfera, incidente com um ângulo zenital x . A variação na intensidade $d\phi$ devido à absorção entre os níveis de z e $z + dz$ é dada por:

$$d\phi(z, \lambda) = -\sigma^{(a)}(\lambda) \cdot n(z) \cdot \phi(z, \lambda) \cdot \sec(x) \cdot dz, \quad (1)$$

onde $\sigma^{(a)}(\lambda)$ denota a seção transversal de absorção. A dependência com a altura, do fluxo incidente é dada por:

$$\phi(z, \lambda) = \phi_{\infty}(\lambda) \cdot e^{-\tau(\lambda, z, x)}, \quad (2)$$

E assim:

$$\tau(\lambda, z, x) = \int_z^{\infty} \sigma^{(a)} \cdot n(z') \cdot \sec(x) \cdot dz', \quad (3)$$

A Equação 3 representa a profundidade ótica, e $\phi_{\infty}(\lambda)$ representa o fluxo da radiação solar fora da atmosfera. A taxa de fotoionização, na altitude z , é dada por:

$$q(z, x) = \sigma^{(i)}(\lambda) \cdot n(z) \cdot \phi_{\infty} \cdot e^{-\tau(\lambda, z, x)}, \quad (4)$$

Em que $\sigma^{(i)}(\lambda)$ denota a seção transversal de ionização. As expressões acima podem ser facilmente estendidas para obter a taxa de fotoionização numa atmosfera com várias espécies, esfericamente estratificada, somando-se sobre as várias espécies e os vários comprimentos de onda. Assim a taxa de fotoionização total, na distancia radial r , com o fluxo de radiação solar incidindo com um ângulo zenital x é:

$$q_T(r, x) = \sum_J \int_{\lambda} d\lambda. \sigma_J^{(i)}(\lambda). n_J(r). \Phi_{\infty}(\lambda). \epsilon^{-\tau(\lambda, z, x)}. \quad (5)$$

As correntes elétricas que existem na ionosfera podem ser expressas como função do campo elétrico E , por meio da lei de Ohm generalizada, dada por:

$$J = \sigma. E, \quad (6)$$

Em que σ é o tensor de condutividade. A condutividade é um tensor, em consequência da anisotropia introduzida pelo campo magnético da Terra. O tensor condutividade se divide em três componentes, dadas por:

- Condutividade Pedersen:

$$\sigma_1 = \frac{\epsilon_0 \omega_e^2 v_e}{v_e^2 + \omega_{ce}^2} + \sum_i \frac{\epsilon_0 \omega_i^2 v_i}{v_i^2 + \omega_{ci}^2} \quad (7)$$

- Condutividade Hall:

$$\sigma_2 = -\frac{\epsilon_0 \omega_e^2 \omega_{ce}}{v_e^2 + \omega_{ce}^2} + \sum_i \frac{\epsilon_0 \omega_i^2 \omega_{ci}}{v_i^2 + \omega_{ci}^2} \quad (8)$$

- Condutividade Longitudinal:

$$\sigma_0 = \frac{\epsilon_0 \omega_e^2}{v_e} + \sum_i \frac{\epsilon_0 \omega_i^2}{v_i} \quad (9)$$

Nas Equações 7, 8, e 9, a frequência do plasma é dada por $\omega_\alpha = \sqrt{\frac{n_\alpha e^2}{m_\alpha \epsilon_0}}$, e a frequência ciclotrônica é $\omega_{c\alpha} = e \frac{B}{m_\alpha}$. ν_α é a frequência média de colisões para transferência de quantidade de movimento para a espécie α , que é para elétrons (subíndice e) e íons (subíndice i). Em grandes altitudes a única condutividade que é importante é a Longitudinal (σ_0). Assim, as partículas carregadas são confinadas a linhas de força individuais, ao longo das quais elas se movem livremente, devido à grande condutividade σ_0 ao longo do campo.

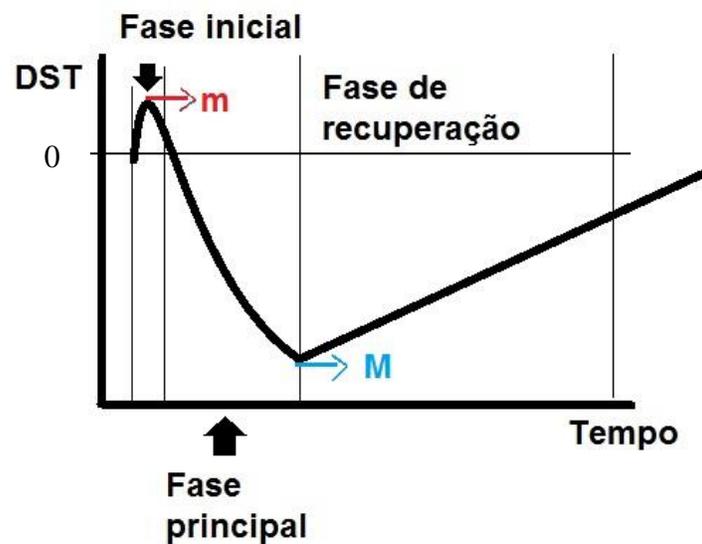
2.4 TEMPESTADES GEOMAGNÉTICAS

Quando ocorre uma Ejeção de Massa Coronal (*Coronal Mass Ejection* – CME) geofetiva, ou seja, que atinge o planeta Terra, pode (dependendo da intensidade) ocorrer o forte e prolongado acoplamento entre o vento solar e a magnetosfera, caracterizando assim uma tempestade geomagnética. As partículas proveniente do vento solar são ejetadas na magnetosfera interna, enriquecendo as partículas presentes na corrente de anel (Kivelson e Russel, 1995), um sistema de correntes elétricas que circula a Terra em latitudes equatoriais, que pode causar o decréscimo do índice Dst (Gonzales et al., 1994; Costa Jr et al., 2011).

As tempestades magnéticas possuem fases. A primeira é conhecida como início gradual (*gradual commencement* – G.C.) ou com início súbito (*Sudden commencement* – S.C.), onde se identifica um impulso súbito (*Storm Sudden Commencement* – S.S.C.). Não há definição exata para um S.S.C. Entretanto trata-se de uma mudança brusca no campo magnético da Terra na fase inicial de uma tempestade magnética. Tempestades do tipo G.C. são observadas em relação a outras tempestades, e com recorrência de 27 dias (Amarante, 1967). Uma peculiaridade interessante é que os S.S.C. ocorrem primeiro nas altas e médias latitudes. Muitas tempestades são precedidas por vários impulsos, ao invés de um único (Balmaceda, 2003).

A classificação das tempestades geomagnéticas, em intensidade, é feita em função da máxima variação positiva (m) ocorrida na fase inicial e da máxima variação negativa (M) na fase principal, como esquematicamente mostrado na Figura 2.16. Essas fases podem ser observadas na figura por meio de um gráfico típico do índice Dst, em função do tempo.

Figura 2.16 - Fases de uma tempestade geomagnética.



A tempestade magnética é classificada como (Gonzales et al., 1994):

- Fraca: $-50 < Dst \leq -30$ nT;
- Moderada: $-100 < Dst \leq -50$ nT;
- Intensa: $-250 < Dst \leq -100$ nT; e
- Muito Intensa: $Dst \leq -250$ nT.

O campo magnético é relativamente calmo, com apenas leves variações de amplitude. Entretanto ao se entrar na fase inicial de uma tempestade magnética, o valor médio da componente horizontal do campo magnético permanece acima do normal por várias horas nas baixas latitudes. Em geral são maiores as tempestades aquelas em que é menor a duração desta fase. Em quase todas as tempestades com início súbito, o S.S.C. coincide com o início desta fase.

O início da fase principal é uma grande queda no valor da componente horizontal do campo geomagnético nas baixas latitudes. Durante uma tempestade, as variações na componente vertical (Z) do campo geomagnético são muito menores que as variações horizontais (H), além de ocorrerem com o sinal oposto, isto é, quando H aumenta e Z diminui e vice versa. Essas variações são simultâneas em ambos os hemisférios, no equador as variações em Z são nulas, sendo máximas as de H que diminui à medida que a latitude aumenta. Por final, tem-se a fase de recuperação que acaba quando o índice Dst chega a zero, esta fase pode durar por dias. Além do índice Dst, existem outros para o estudo da interação Sol – Terra, que são discutidos na próxima seção.

2.4.1 ÍNDICES GEOMAGNÉTICOS

O grau de perturbação magnética durante cada dia de Greenwich (dia com base na hora GMT) é indicado por vários índices de acordo com planos adotados internacionalmente sob os auspícios e supervisão do “*committee on characterization of magnetic disturbances of IAGA (International Association of Geomagnetism and Aeronomy)*”. A IAGA faz parte da IUGG (*International Union of Geodesy and Geophysics*), a qual por sua vez pertence a ICSU (*International Council of Scientific Unions*). Vários são os índices usados para descrever os distúrbios magnéticos, e suas relações com fenômenos solares e geofísicos. Uma revisão sobre tais índices pode ser encontrado no trabalho de Rostoker (1972).

O índice Kp fornece uma ideia da atividade magnética, através da medida da faixa de variações em vários observatórios. O índice representa uma média ponderada sobre todo o planeta. Um índice 7 equivale a 200 - 330 nT, 8 a 330 - 500 nT e 9 acima de 500 nT. Entretanto, tem sido tradicionalmente ao índice Kp um significado físico mais profundo. O índice Kp foi, na realidade, projetado para medir a intensidade variável de radiação solar de partículas através de seus efeitos geomagnéticos. A grande faixa de intensidades desta radiação de partículas é claramente expressa por Kp.

Era de modo geral aceito que um alto valor de Kp significava intenso fluxo de vento solar. Entretanto o índice Kp não seria uma medida do fluxo de plasma solar através da Magnetosfera, e sim uma medida da turbulência e irregularidades no vento solar. Se o vento solar fosse laminar, não importaria a força do mesmo que o índice Kp seria baixo.

Com base no fato de que a magnetopausa é estável no vento solar, resultante da análise de magnetômetros e dados de satélites e foguetes. As flutuações transitórias medidas nos observatórios são transmitidas da magnetopausa para a superfície da Terra por ondas hidromagnéticas. Se a magnetopausa é estável, todas as flutuações geomagnéticas transmitidas de lá para a Terra por ondas Hidromagnéticas (HM) resultariam de flutuações na pressão total do meio interplanetário. Conclui-se que as ondas HM são geradas pela razão de variação do vento solar e da pressão magnética contra a magnetosfera, e então Kp é uma medida disto (Amarante, 1967).

O índice Dst (*Disturbance Storm Time*) representa o invólucro das curvas de medidas do campo magnético terrestre de vários magnetômetros localizados na região equatorial ao longo do planeta. No índice Dst é bem visível as fases de uma tempestade magnética, como esquematicamente mostrado na Figura 2.16. Este índice monitora a variação da corrente de anel na magnetosfera terrestre. As variações negativas do índice Dst são decréscimos no campo geomagnético produzidas principalmente pelo sistema equatorial de corrente na magnetosfera da Terra, que é aumentado durante tempestades geomagnéticas.

O índice do Eletrojato Auroral (AE) é obtido a partir de uma cadeia de magnetômetros dispostos ao longo do globo terrestre na zona do Eletrojato Auroral. Este índice representa a diferença entre o invólucro superior (AU – *Auroral Upper*) e inferior (AL – *Auroral Lower*) dos registros de magnetômetros obtidos a partir de vários equipamentos. Sua intensidade é proporcional ao depósito de energia cinética das partículas que se precipitam na região auroral (Yamashita, 2000).

3 INSTRUMENTAÇÃO E METODOLOGIA

3.1 MAGNETÔMETROS

Os magnetômetros de indução é um dos magnetômetros mais simples. O seu princípio de funcionamento está baseado na lei de Faraday, que determina o aparecimento de uma força eletromotriz induzida quando uma espira é exposta a variação de um fluxo magnético. A Lei de Faraday é dada por:

$$\int \vec{E} dl = -\frac{d}{dt} \iint \vec{B} \cdot \hat{n} \cdot dS \quad (3.1)$$

Os magnetômetros de indução podem na verdade utilizar duas técnicas para utilizar a medição de um campo magnético. Em um tipo é utilizado o artifício de girar as espiras do sensor na presença do campo magnético, de forma a criar a variação do fluxo magnético que atravessa a espira. Dessa forma, é possível obter o valor absoluto do campo, mas as partes e peças giratórias do sensor geram problemas de vibração e alto ruído nas medidas. Por estes motivos esse tipo de técnica é muito pouco utilizada.

Outro modo mais simples é a utilização de bobinas de indução, que são capazes de medir apenas as variações do campo geomagnético, e não seu valor absoluto. A sensibilidade desses sensores é limitada por variações nas tensões ao longo do fio, causada pela concentração local de elétrons em equilíbrio termodinâmico, conhecido por ruído de Nyquist. Estes magnetômetros são geralmente usados para medir pulsações geomagnéticas.

Os magnetômetros SQUID (*superconducting quantum interference device*) são equipamentos de alta sensibilidade usados para medição de campos extremamente pequenos. Seu princípio de funcionamento é baseado na supercondutividade, no efeito Josephson e na quantização do fluxo magnético.

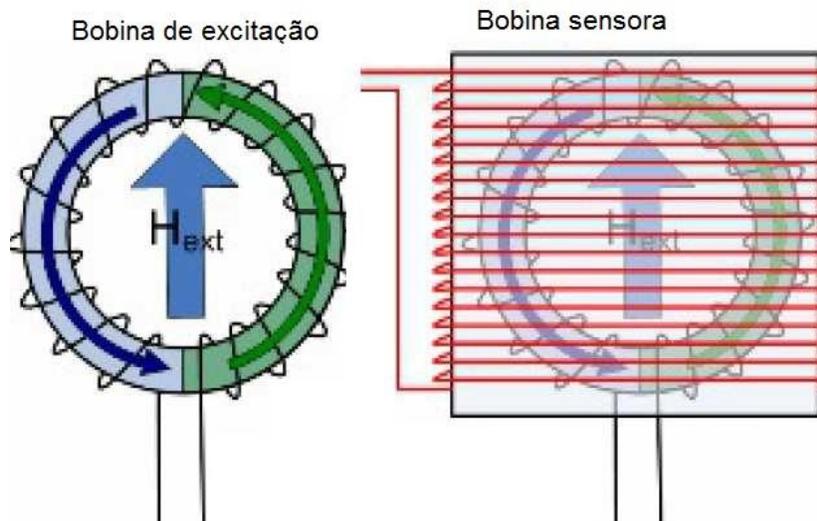
O magnetômetro SQUID é formado por um anel supercondutor com duas junções Josephson. Quando um campo magnético constante é aplicado perpendicularmente a um anel supercondutor que contém duas junções Josephson, efeitos de interferência fazem com que a corrente total dependa da intensidade do campo magnético. Este fenômeno permite aos magnetômetros SQUID fazerem medições de campos magnéticos muito baixos da ordem de 10^{-15} T. Esse tipo de magnetômetro é bastante caro e exige resfriamento com nitrogênio líquido para a aplicação dos efeitos da supercondutividade, o que dificulta seu uso e manutenção, sendo pouco utilizado em pesquisas geomagnéticas.

Os magnetômetros de efeito hall funcionam quando se tem um condutor com certa corrente, e este condutor é imerso em um campo magnético, fazendo com que as cargas desse condutor sofram ação de uma força devido a esse campo. As cargas portadoras são defletidas para o lado de baixo do condutor, criando uma diferença de potencial neste. Os elétrons do fio são forçados para baixo pela ação do campo magnético, criando uma diferença de potencial entre a parte superior e inferior do condutor. Isto faz com que seja gerado um campo elétrico com sentido para baixo no condutor, criando uma força que atua nas cargas com sentido para cima, freando os elétrons. O equilíbrio é alcançado quando a força elétrica é igual a força magnética.

Magnetômetros de efeito Hall são pouco empregados em estudos para a medição do campo geomagnético devido a sua baixa sensibilidade. Por outro lado, este tipo de sensor magnético é bastante usado para medidas de campos com alta intensidade devido a sua simplicidade e eficiência (Antunes, 2009).

Na configuração mais básica do magnetômetro de núcleo saturado, o sensor *fluxgate* é constituído por um núcleo de material ferromagnético, de alta permeabilidade, envolto por dois sistemas de bobinas conforme mostra a Figura 3.1. O sistema de bobina de excitação leva o núcleo aos limites de saturação através de uma corrente periódica e a outra bobina serve para detectar o segundo harmônico deste sinal de excitação, que traz a informação do campo magnético externo.

Figura 3.1 - Ilustração da bobina de excitação envolvendo um núcleo de ferro e bobina sensora.



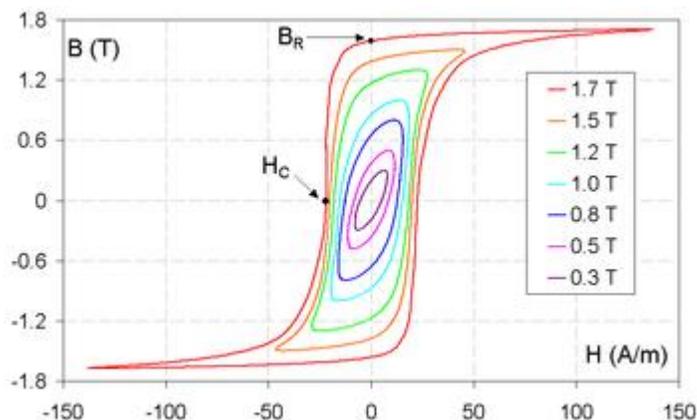
Fonte: Modificado de www.imperial.ac.uk

A variação do fluxo magnético que atravessa uma espira pode ser espontânea se o campo externo for variável no tempo, se houver variação da área da espira ou rotação da espira dentro do campo magnético, ou ainda provocada por variação da permeabilidade do meio. Para medidas do campo geomagnético, geralmente não são usadas técnicas de variação de área da bobina, e nem a rotação do sensor, sendo a variação da permeabilidade do meio utilizado em magnetômetros de fluxo saturado. A saturação do núcleo de ferro pode ser estudada em termos da chamada Curva de Histerese.

A Curva de Histerese pode ser compreendida da seguinte forma. A bobina de excitação aplica um campo H no núcleo de ferro até a saturação, e em seguida diminui a intensidade do campo aplicado. Nessas condições, a densidade de fluxo não diminui tão rapidamente quanto o campo H . Dessa forma quando H chega a zero, ainda existe uma densidade de fluxo remanescente. Para que \vec{B} (T) chegue a zero, é necessário aplicar um campo negativo, chamado de força coercitiva. Este fenômeno que causa o atraso entre densidade de fluxo e

campo magnético é chamado de histerese magnética, e um exemplo é mostrado na Figura 3.2.

Figura 3.2 - Ciclo de histerese magnética. $B(T)$ é o campo magnético interno do núcleo, $H(A/m)$ intensidade de campo magnético aplicado e H_c é a força coercitiva.



Fonte:efisica.if.usp.br

Quando se aplica uma diferença de potencial nos terminais da bobina de excitação surge um campo magnético induzido em sentido oposto. Dessa maneira, se não houver campo magnético externo, a medida na bobina sensora é zero e, na presença de campo externo, a medida da corrente na bobina sensora varia conforme a intensidade do campo. A tensão medida na bobina sensora é dada por:

$$V(t) = n A \mu_0 H \frac{d\mu_e}{dt}, \quad (11)$$

onde n é o numero de voltas da bobina, A é a área de seção transversal do núcleo, μ_0 é a permeabilidade do vácuo, H é o campo externo e μ_e é a permeabilidade relativa do núcleo. No caso H é o campo geomagnético.

3.2 REDE Embrace DE MAGNETÔMETROS

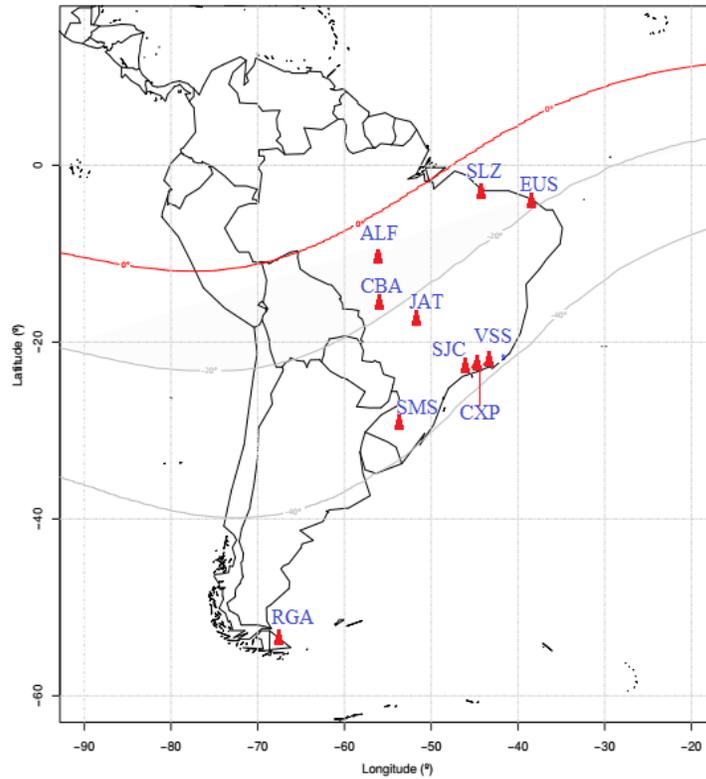
O Programa Embrace é um programa do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE/MCTIC que visa à difusão do conhecimento sobre Clima Espacial. O programa monitora em tempo real as condições do ambiente solar-terrestre, com os observatórios de radio telescópio, telescópios de múons, estações de receptor GPS, observatórios de ionosfera e estações de magnetômetros. Para este trabalho, são avaliadas três tempestades geomagnéticas com os dados obtidos dos magnetômetros da Rede Embrace. A descrição básica da Rede Embrace é encontrado em Denardini et al. (2015).

No mapa da Figura 3.3 estão indicadas as cidades em que se encontram as estações de magnetômetros da Rede Embrace/INPE utilizados neste trabalho, sendo elas São Luís do Maranhão/MA (SLZ), Eusébio/CE (EUS), Alta Floresta/MS (ALF), Cuiabá/MT (CBA), Jataí/GO (JAT), Vassouras/RJ (VSS), Cachoeira Paulista/SP (CXP), São José dos Campos/SP (SJC), São Martinho da Serra/RS (SMS) e Rio Grande (RGA), na Argentina. As coordenadas geográficas estão mostradas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Tabela das coordenadas Geográficas e Magnéticas das estações de magnetômetros utilizadas.

Cidade	Coordenadas Geográficas	Coordenadas Magnéticas
São Luís do Maranhão	2.52° S / 44.30° O	6.06° N / 28.47° L
Eusébio	3.89° S / 38.45° O	5.03° N / 34.72° L
Alta Floresta	9.52° S / 56.05° O	0.35° N / 16.42° L
Cuiabá	15.35° S / 56.05° O	6.18° S / 16.02° L
Jataí	17.52° S / 51.42° O	8.68° S / 20.13° L
Vassouras	22.24° S / 43.39° O	13.72° S / 27.48° L
Cachoeira Paulista	22.39° S / 45.00° O	13.34° S / 26.18° L
São José dos Campos	23.10° S / 45.53° O	14.32° S / 25.30° L
São Martinho da Serra	29.53° S / 53.86° O	20.28° S / 17.38° L
Rio Grande	53.47° S / 67.42° O	43.94° S / 4.06° L

Figura 3.3 - Disposição dos magnetômetros da rede Embrace, com o equador magnético em vermelho.



Fonte: Modificado de Marchezi (2016).

Cada estação possui um magnetômetro de núcleo saturado (*fluxgate*), que realiza medidas com resolução de 0,1 nT, com um intervalo de amostragem de até 1s. As especificações dos magnetômetros utilizados pelo Programa Embrace encontram-se na Figura 3.4, e também no trabalho de Denardini et al. (2015).

Figura 3.4 - Especificações dos magnetômetros do Programa Embrace.

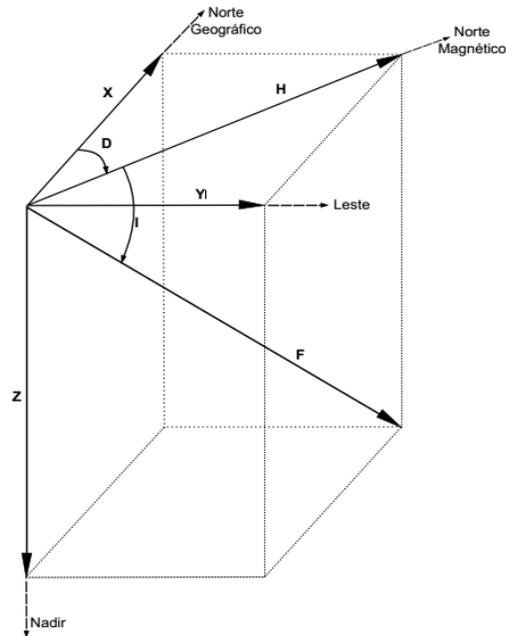
Especificações	
Faixa de operação	± 75000 nT
Faixa dinâmica, três opções	$\pm 250, 1000, 2500$ nT
Sensibilidade	$2,5$ mV/nT
Resolução	$0,1$ nT
Precisão	$0,25\%$
Ortogonalidade	$< 0,5^\circ$
Offset a $25^\circ C$	< 1 nT
Deriva para zero	$< 0,1$ nT/ $^\circ C$
Coef. de estala de temperatura	$+20$ ppm/ $^\circ C$
Alimentação	$+12$ V($10,5$ $28,0$ V)
Corrente	$+320$ mA
Tensão de saída analógica	$\pm 2,5$ V
Saída digital	USB
Largura de banda	3 kHz
Ruído do sensor	15 pTrms/Hz ^{1/2} em 1 Hz
Potência rejeitada	> 100 dB
Impedância de saída DC	< 10 ohm
Especificações mecânicas e ambientais	
Temperatura de operação	$-20^\circ C$ a $+75^\circ C$
Caixa do sensor	Camada dupla de PVC
Proteção do sensor	À prova d'água
Dimensões do sensor sem o conector	104 cm de comprimento, 18 cm de diâmetro
Comprimento do cabo do sensor	25 m
Conector de 10 pinos do sensor	Amphenol tipo militar
Proteção da unidade de controle	À prova de respingos
Peso total	34 kg

Fonte: Marchezi (2016).

3.3 METODOLOGIA DE ANÁLISE DOS DADOS

O campo geomagnético é tridimensional e tem como a intensidade total do vetor o módulo $|F|$. Este vetor é decomposto em 2 dimensões do plano cartesiano da Figura 3.5, sendo elas a componente Z que aponta para o nadir, a componente H que aponta para o norte magnético e está no plano xy . E para atender as 3 dimensões do vetor, leva-se em consideração o ângulo de inclinação entre o módulo $|F|$ e a componente H . A direção x aponta para o norte geográfico e possui uma declinação com relação a componente H , pois o norte geográfico e magnético possuem um ângulo entre eles.

Figura 3.5 - Decomposição do vetor campo magnético terrestre nas componentes Z e H levando em conta o ângulo de declinação entre a componente H e o norte geográfico (direção x) e também o ângulo de inclinação entre o módulo $|F|$ e a componente H



Fonte: Modificado de Marchezi (2016).

O método consiste em manter um magnetômetro que meça o módulo $|F|$ do campo geomagnético, as componentes H e Z , a inclinação e declinação do vetor campo magnético terrestre e analisar as variações durante uma tempestade geomagnética. Os dados obtidos para confecção dos gráficos presentes neste trabalho foram recebidos como mostra o exemplo da Figura 3.7. Estes dados foram manuseados plotados no programa Origin.

As mesmas abreviações presentes no mapa da Figura 3.3, estão presentes na Figura 3.6, que mostra a disponibilidade de dados da Rede Embrace utilizados nesse trabalho.

Figura 3.6 - Disponibilidade de dados de magnetômetros do programa Embrace para cada cidade.

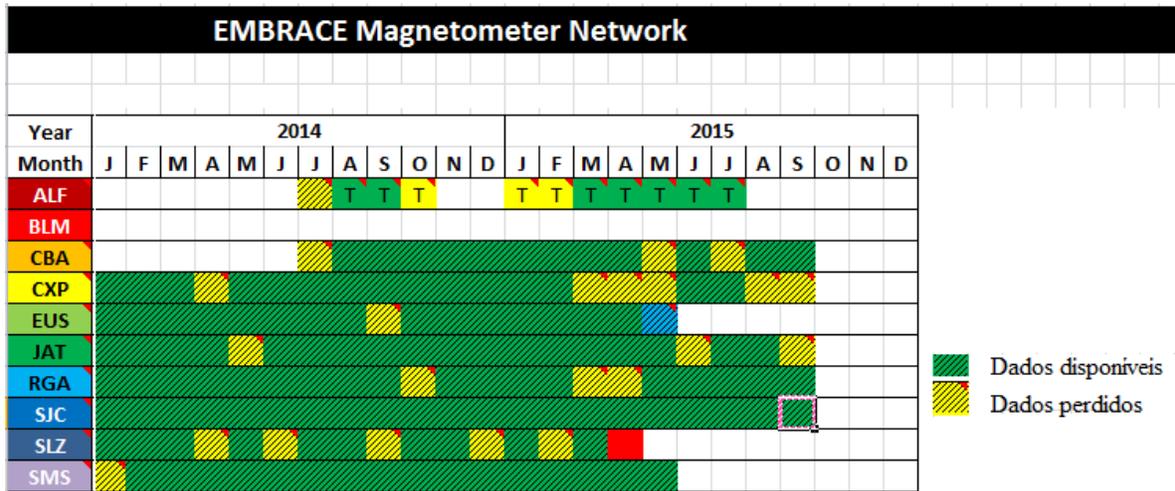


Figura 3.7 - Exemplo de dados dos magnetômetros do programa Embrace, utilizados para a análise das tempestades.

VASSOURAS EMBRACE-07 <153> 1 Min. Reported data									
DD	MM	YYYY	HH	MM	D (Deg)	H (nT)	Z (nT)	I (Deg)	F (nT)
02	06	2015	00	00	-22.4834	18113.9	-14493.8	-38.6650	23198.8
02	06	2015	00	01	-22.4837	18113.6	-14493.8	-38.6653	23198.6
02	06	2015	00	02	-22.4834	18113.5	-14493.8	-38.6654	23198.5
02	06	2015	00	03	-22.4830	18113.5	-14493.9	-38.6658	23198.5
02	06	2015	00	04	-22.4829	18113.4	-14493.8	-38.6656	23198.4
02	06	2015	00	05	-22.4829	18113.3	-14493.6	-38.6654	23198.2
02	06	2015	00	06	-22.4830	18113.3	-14493.7	-38.6656	23198.3
02	06	2015	00	07	-22.4829	18113.3	-14493.8	-38.6659	23198.4
02	06	2015	00	08	-22.4829	18113.3	-14493.8	-38.6658	23198.3
02	06	2015	00	09	-22.4831	18113.2	-14494.1	-38.6665	23198.5
02	06	2015	00	10	-22.4831	18113.3	-14494.1	-38.6665	23198.5
02	06	2015	00	11	-22.4832	18113.0	-14494.0	-38.6667	23198.3
02	06	2015	00	12	-22.4832	18112.9	-14494.0	-38.6668	23198.2
02	06	2015	00	13	-22.4834	18112.9	-14494.2	-38.6673	23198.2

Os dados exibidos no exemplo da Figura 3.7 a cada minuto são plotados dados no Brasil em São Luiz (MA), Eusébio (CE), Alta Floresta (MT), Cuiabá (MT), Jataí (GO), Vassouras (RJ), Cachoeira Paulista (SP), São José dos Campos (SP), São Martinho da Serra (RS) e na Argentina em Rio Grande. As coordenadas geográficas e magnéticas de cada região são exibidas na Tabela 3.1.

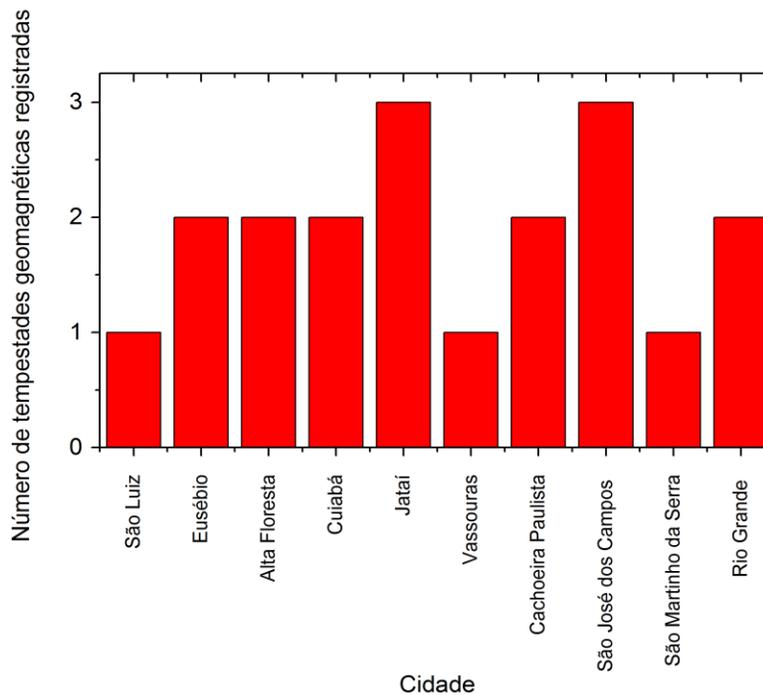
Será feito o uso do programa Origin para a confecção dos gráficos visando entender a relação Sol-Terra. Os gráficos construídos para a análise da tempestade geomagnética incluem as variações latitudinais do módulo $|F|$ e as componentes H e Z do campo geomagnético de todas as estações. E por último o gráfico do mínimo valor da componente H versus a inclinação de cada estação. Para um completo entendimento do fenômeno os dados de cada componente apresentarão as variações que foram registradas em todas as estações. E por fim os resultados observados serão condensados na forma de tabelas e histogramas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este trabalho faz uma análise dos dados dos magnetômetros do Programa Embrace/INPE para o estudo da variação latitudinal do campo geomagnético durante três tempestades geomagnéticas. Diante disso, as próximas seções apresentam os resultados para cada tempestade geomagnética, de forma separada. A seguir, as discussões dos resultados são apresentadas para os três períodos simultaneamente. Por fim, são descritas outras atividades desenvolvidas pelo bolsista durante o Projeto de Iniciação Científica PIBIC/INPE.

O histograma da Figura 4.1 mostra o número de tempestades geomagnéticas analisadas para cada um dos magnetômetros das estações da Rede Embrace referentes à Tabela 3.1.

Figura 4.1 - Histograma do número de eventos registrados.

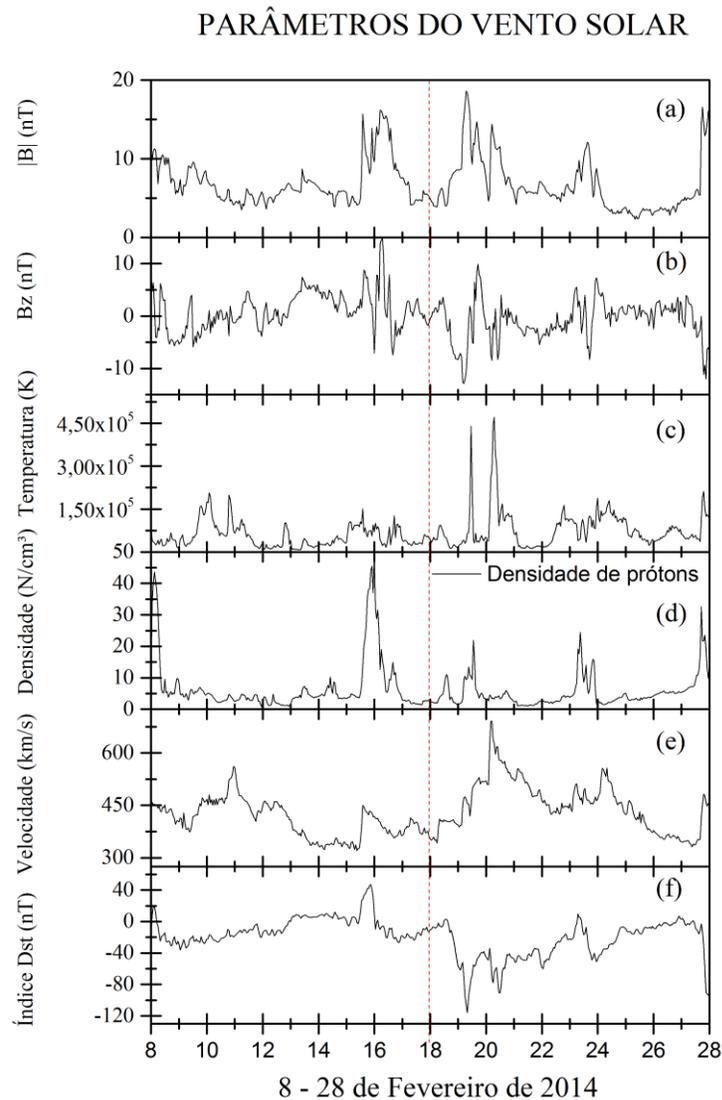


4.1 RESULTADOS: TEMPESTADE GEOMAGNÉTICA DE 18/02/2014

O primeiro evento a ser estudado é a tempestade geomagnética que ocorreu no dia 18 de Fevereiro de 2014. Com o objetivo de realizar uma descrição completa da tempestade, foram selecionados dados do satélite ACE alguns dias antes e depois da tempestade. Dessa forma, a Figura 4.2 mostra as propriedades do meio interplanetário, que será abordado simplesmente como parâmetros do vento solar, entre os dias 8 e 28 de Fevereiro. A linha pontilhada em vermelho indica o dia em que ocorreu a tempestade geomagnética, no dia 18 de Fevereiro. De cima para baixo, o painel (a) mostra o módulo do campo magnético interplanetário (IMF – *interplanetary magnetic field*), seguido pela sua componente B_z no painel (b), temperatura no painel (c), densidade de prótons no painel (d), a velocidade do vento solar no painel (e), e finalmente, o índice Dst no painel (f). É importante mencionar que o índice Dst não é obtido do satélite ACE, e sim de uma rede de magnetômetros instalados em solo, como explicado na Seção 2.4.1. O padrão adotado na Figura 4.2 é o mesmo adotado no restante dos gráficos sobre os parâmetros do vento solar (Figuras 4.2, 4.7, 4.12).

Antes da linha pontilhada, entre os dias 15 e 16 de Fevereiro, a componente B_z do IMF oscila entre aproximadamente ± 10 nT, o que indica que houve variações do plasma do vento solar na posição do satélite ACE. Conforme o índice Dst, ocorreu leve aumento do campo medido pelos magnetômetros. Como o índice Dst não apresentou valores negativos significativos, não ocorreu uma tempestade geomagnética. Entretanto, após a linha pontilhada, a componente B_z (b), e o índice Dst, tem um decréscimo abrupto. Esse decréscimo da componente B_z foi suficiente para aumentar a corrente de anel, e gerar um campo magnético contrário ao campo geomagnético, tornando o valor do índice Dst negativo. Nesse caso, pode ter ocorrido reconexão magnética entre as linhas de campo da CME, e do campo geomagnético, seguido de uma possível precipitação de partículas nos pólos (assuntos não abordados nesse trabalho) e também uma variação significativa na corrente de anel.

Figura 4.2 - Parâmetros do vento solar medidos pelo satélite ACE entre os dias 8 e 28 de Fevereiro de 2014: (a) Módulo do IMF, (b) componente Z do IMF (c) Temperatura, (d) Densidade de prótons, (e) velocidade do vento solar, e (f) índice Dst, obtido com magnetômetros.



A Figura 4.3 mostra a variação latitudinal do módulo do campo geomagnético observada nas estações de magnetômetros consideradas nessa tempestade geomagnética, junto com o índice Dst, e as fases da tempestade, entre os dias 17 e 21 de Fevereiro de 2014. Esse

padrão é adotado no restante dos gráficos sobre o módulo do campo geomagnético (Figuras 4.8 e 4.13). O objetivo desse gráfico é analisar a variação latitudinal da intensidade do módulo do campo geomagnético durante todas as fases da tempestade geomagnética.

O maior valor de $|F|$ é observado em Rio Grande (Argentina), com intensidade de ≈ 31.402 nT. O valor correspondente a Eusébio fica em ≈ 26.000 nT. Em seguida, as estações de São Luís, Cachoeira Paulista, São José dos Campos, e Jataí apresentam valores muito próximos de 23.000 nT. O menor valor de $|F|$ é observado em São Martinho da Serra, com intensidade de ≈ 22.499 nT. A maior variação do módulo $|F|$ foi de $\approx 149,5$ nT em São Luís do Maranhão.

A variação da componente Z do campo geomagnético é apresentado na Figura 4.4, juntamente com o índice Dst. A intensidade da componente Z foi maior em Rio Grande, de ≈ -24.022 nT. Em São Luís do Maranhão foi registrado o menor valor, de ≈ -3.494 nT, e a maior variação de ≈ 63 nT. A Figura 7.2 mostra a variação da componente Z do campo geomagnético observada nas estações de magnetômetros separadamente, durante essa tempestade geomagnética.

A próxima componente a ser exibida na Figura 4.5 é a componente H do campo geomagnético. Na mesma figura também contém o índice Dst, onde foi apontado o menor valor atingido, -116 nT, o que classifica a tempestade geomagnética como intensa. Na componente H o menor valor foi de ≈ 18.005 nT em São Martinho da Serra, e em São Luís com o maior valor da componente H de ≈ 31.402 nT, houve a maior variação que foi ≈ 155 nT. As Figuras 7.1, 7.2, e 7.3, em anexo, mostram as variações de $|F|$, Z e H , respectivamente, nas estações de magnetômetros, durante essa tempestade geomagnética.

Figura 4.3 - Variação do módulo do campo geomagnético seguido do índice Dst, onde está indicado as fases da tempestade geomagnética.

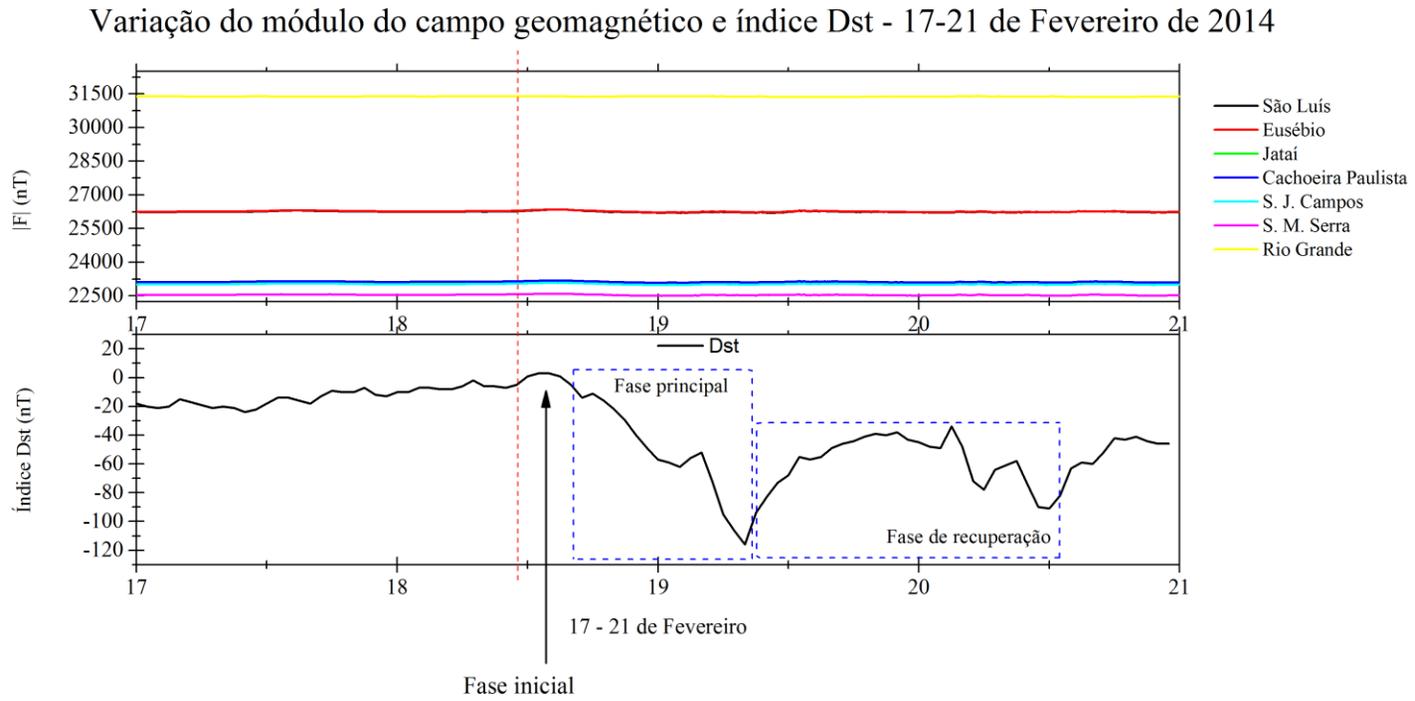


Figura 4.4 - Variação da componente Z do campo geomagnético de cada cidade.

Variação da componente Z e índice Dst durante a tempestade geomagnética de 18 de Fevereiro de 2014

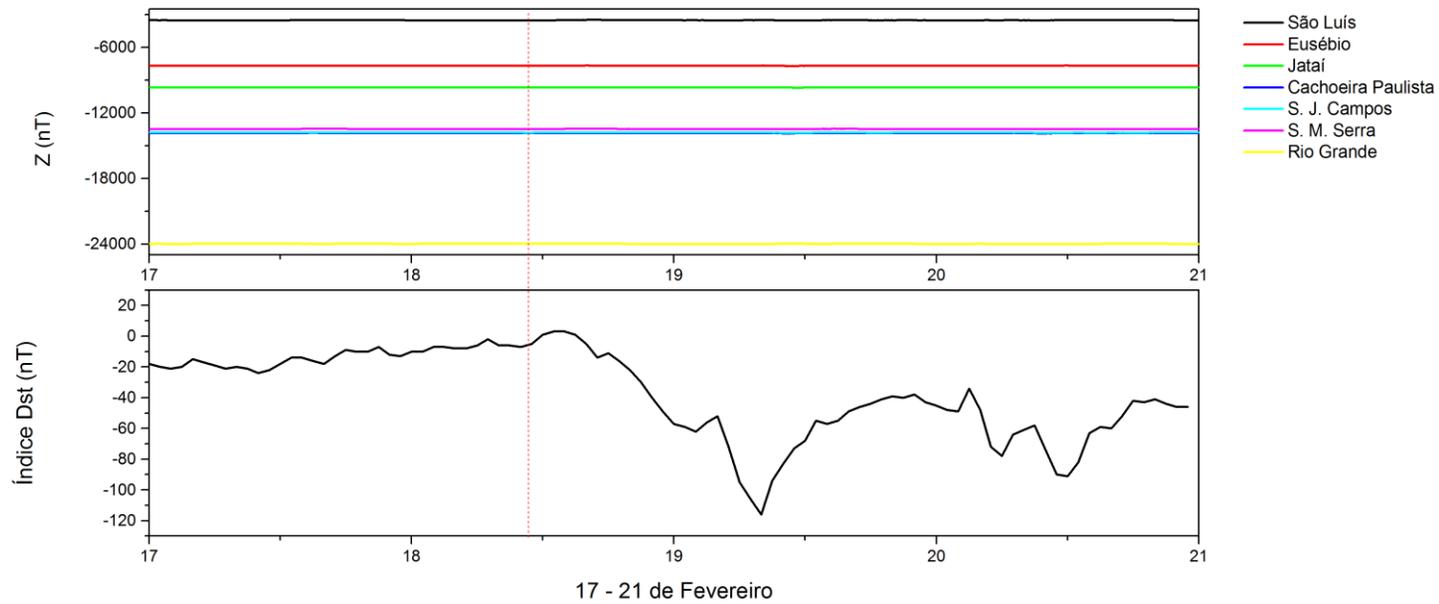
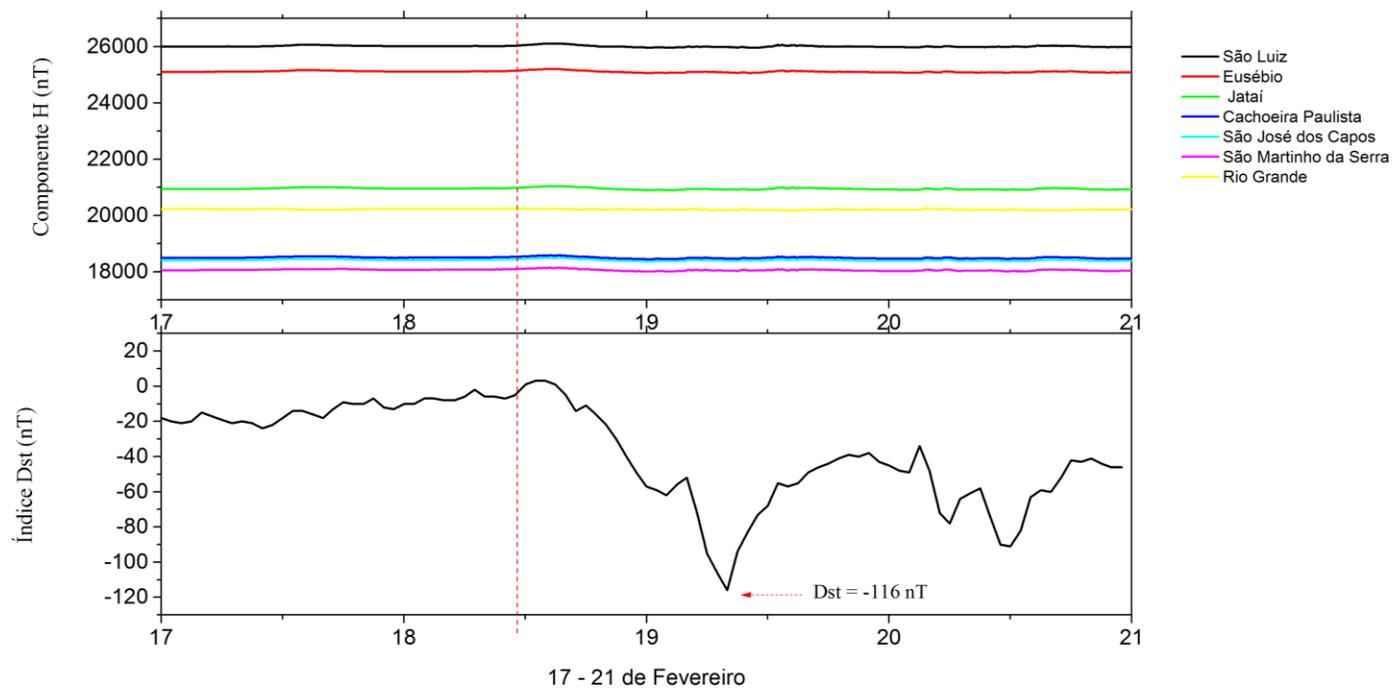


Figura 4.5 - Variação da componente H do campo geomagnético seguido do índice Dst, onde está indicado o mínimo valor atingido.

Variação da componente H e índice Dst durante a tempestade geomagnética de 18 de Fevereiro de 2014



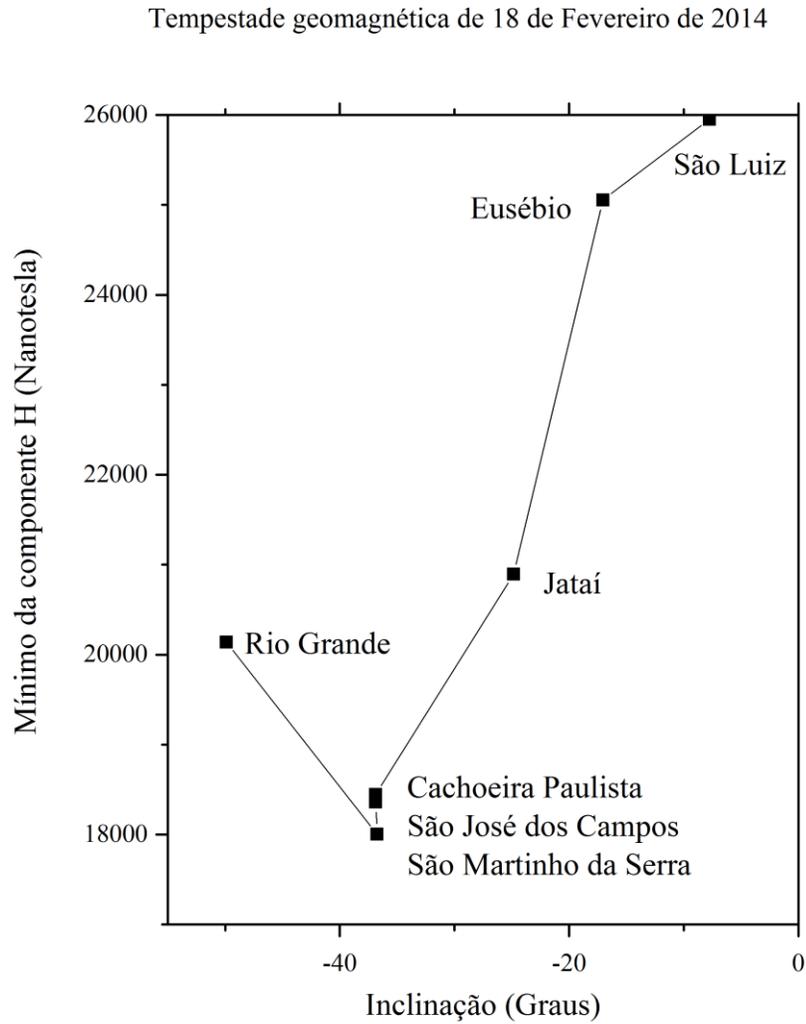
Para completar a descrição da variação latitudinal do campo geomagnético nas estações de magnetômetros, foram encontradas as mínimas variações da componente H para cada estação no dia em que ocorreu a fase principal da tempestade magnética, segundo o índice Dst, que foi no dia 18 de Fevereiro de 2014. A Figura 4.6 exibe no eixo vertical o valor mínimo registrado para cada estação, e no eixo horizontal o ângulo de inclinação magnética do campo geomagnético. O resultado mostra que o valor mínimo da componente H é encontrado em São Martinho da Serra, com valores próximos de 18.000 nT com inclinação igual a 37.57° . A Tabela 4.1 mostra a inclinação e o valor mínimo da componente H para cada uma das estações utilizadas na análise dessa tempestade geomagnética.

Tabela 4.1 - Tabela da inclinação e mínimo valor da componente H do campo geomagnético da tempestade de 18/02/2014.

Cidade	Inclinação (°)	Mínimo da componente H (nT)
São Luís	-7,74	25.953
Eusébio	-17,05	25.055
Jataí	-24,84	20.894
Cachoeira Paulista	-36,86	18.443
São José dos Campos	-36,87	18.362
São Martinho da Serra	-37.57	18.005
Rio Grande	-49,88	20.138

As estações da Tabela 4.1 estão ordenadas no sentido do equador para a Antártida, e nota-se que há uma redução gradual até São Martinho da Serra, região onde se encontra o centro da Anomalia Magnética da América do Sul (AMAS). A AMAS tornou-se evidente em mapas magnéticos desde o início do século XX e caracteriza-se pelo valor mínimo da componente total do campo geomagnético (Abdu et al., 2005; Moro et al., 2012).

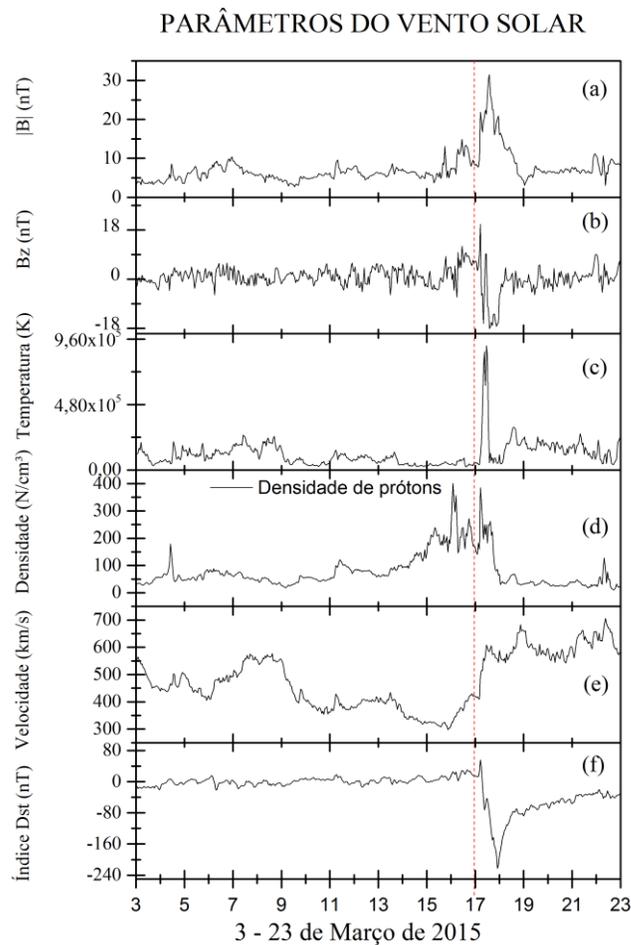
Figura 4.6 - Gráfico do mínimo valor atingido na componente H do campo geomagnético versus a inclinação magnética de cada estação.



4.2 RESULTADOS: TEMPESTADE GEOMAGNÉTICA DE 17/03/2015

O segundo evento a ser estudado é a tempestade geomagnética que ocorreu no dia 17 de Março de 2015. Como já foi introduzido anteriormente, foram selecionados dados do satélite ACE antes e depois da tempestade. Dessa forma, a Figura 4.7 mostra as propriedades do meio interplanetário entre os dias 3 e 23 de Março.

Figura 4.7 - Parâmetros do vento solar medidos pelo satélite ACE entre os dias 3 e 23 de Março de 2015: (a) Módulo do IMF, (b) componente Z do IMF (c) Temperatura, (d) Densidade de prótons, e (f) Índice Dst.



Diferente da Figura 4.2, que foram observados dois picos, na Figura 4.7 há dias com características geomagnéticas calmas até o momento da tempestade geomagnética, que ocorreu no final do dia 17 de Março. Nota-se uma variação em todas as propriedades do vento solar próximos à linha vermelha tracejada. No módulo do IMF (a) há um acréscimo abrupto, e se verifica em (b) que a componente B_z é negativa e de ≈ -18 nT, causando assim um enfraquecimento do campo geomagnético observado em solo pelo índice Dst, devido a intensificação da corrente de anel. Também é relevante observar que há um acréscimo bastante acentuado na temperatura do plasma (c), e um aumento considerável na velocidade do vento solar (e).

A Figura 4.8 mostra a variação do módulo do campo geomagnético, junto com o índice Dst, e as fases da tempestade geomagnética. Nota-se que as estações consideradas são diferentes das consideradas na análise da tempestade anterior (veja histograma da Figura 4.1). Os resultados mostram que o maior valor do módulo em Eusébio é de ≈ 26.366 nT. A menor intensidade é observada em Jataí, com ≈ 22.744 nT. A maior variação do módulo é encontrada em Alta Floresta, de $\approx 397,4$ nT.

Já na variação da componente Z do campo geomagnético da Figura 4.9, em Alta Floresta a componente Z foi maior com ≈ -3.284 nT, e teve a maior variação de ≈ 121 nT. Em São José dos Campos foi registrado o menor valor de ≈ -13.284 nT.

Na Figura 4.10 é mostrado a componente H do campo geomagnético, e o índice Dst durante a tempestade geomagnética de 17 de Março. É apontado pela flecha vermelha tracejada, o valor mínimo do índice Dst de -223 nT, o que categoriza a tempestade geomagnética como intensa. Em São Luís houve a maior variação, ≈ 155 nT, e também o maior valor de ≈ 31.402 nT. E por último, o menor da componente H que foi em São José dos Campos de ≈ 18.036 nT. As Figuras 7.4, 7.5, e 7.6, em anexo, mostram as variações de $|F|$, Z e H , respectivamente, nas estações de magnetômetros, durante essa tempestade geomagnética.

Figura 4.8 - Variação do módulo do campo geomagnético seguido do índice Dst, onde está indicado as fases da tempestade geomagnética.

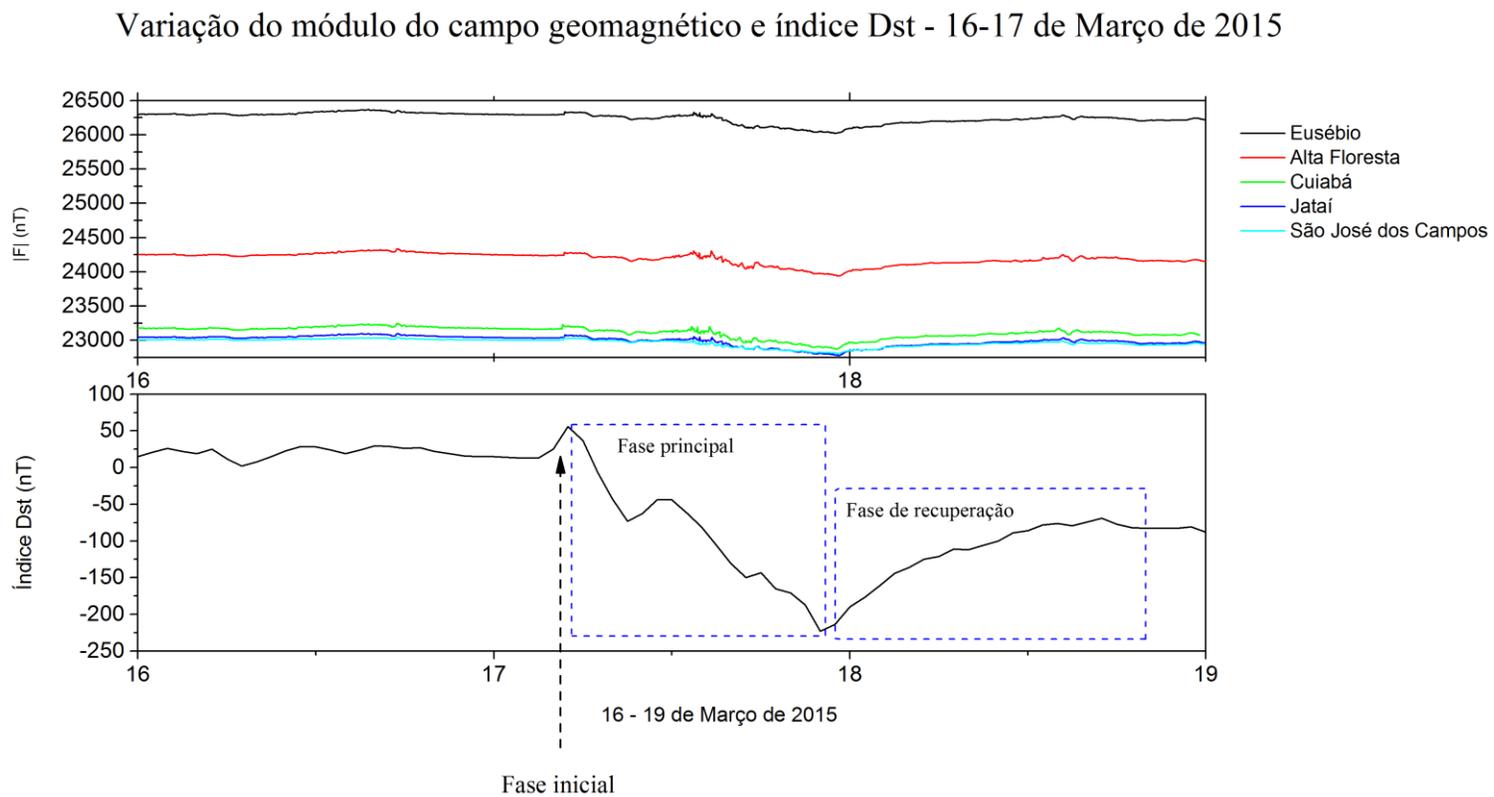


Figura 4.9 - Variação da componente Z do campo geomagnético de cada cidade.

Variação da componente Z do campo geomagnético e índice Dst - 16-19 de Março de 2015

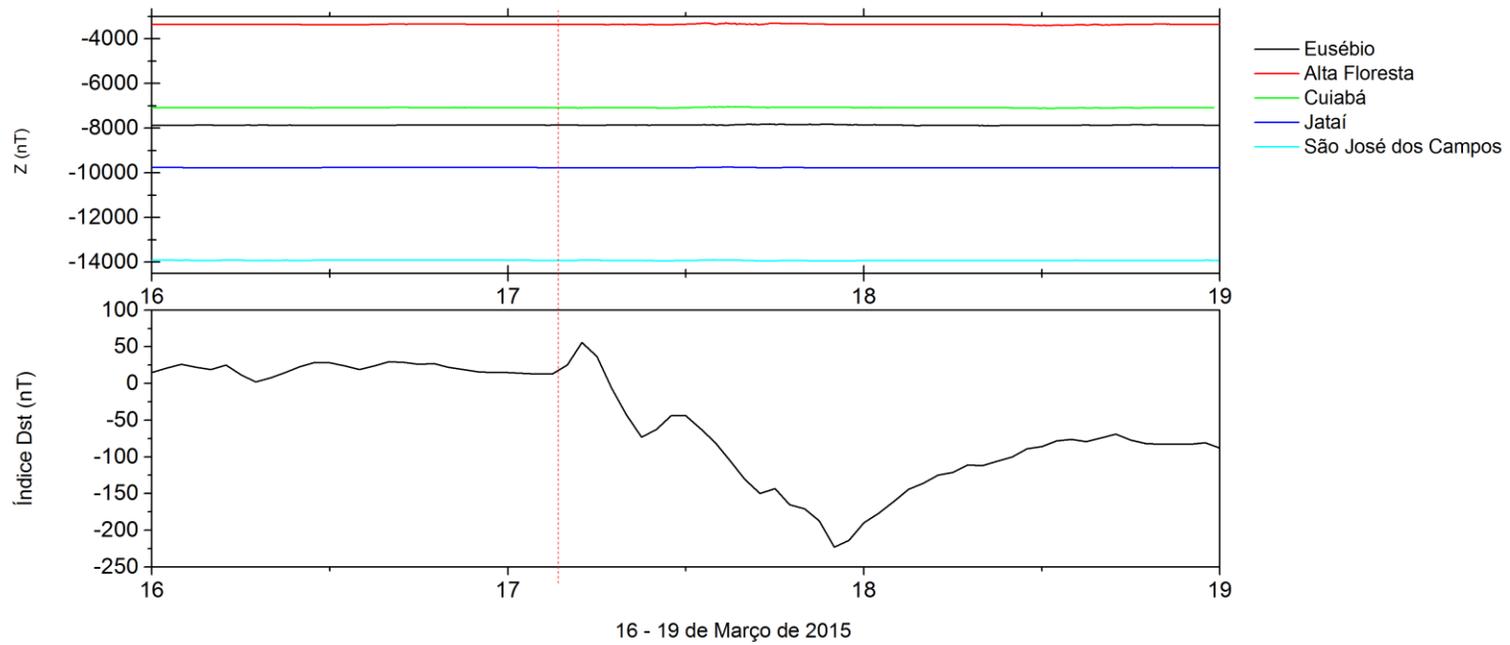
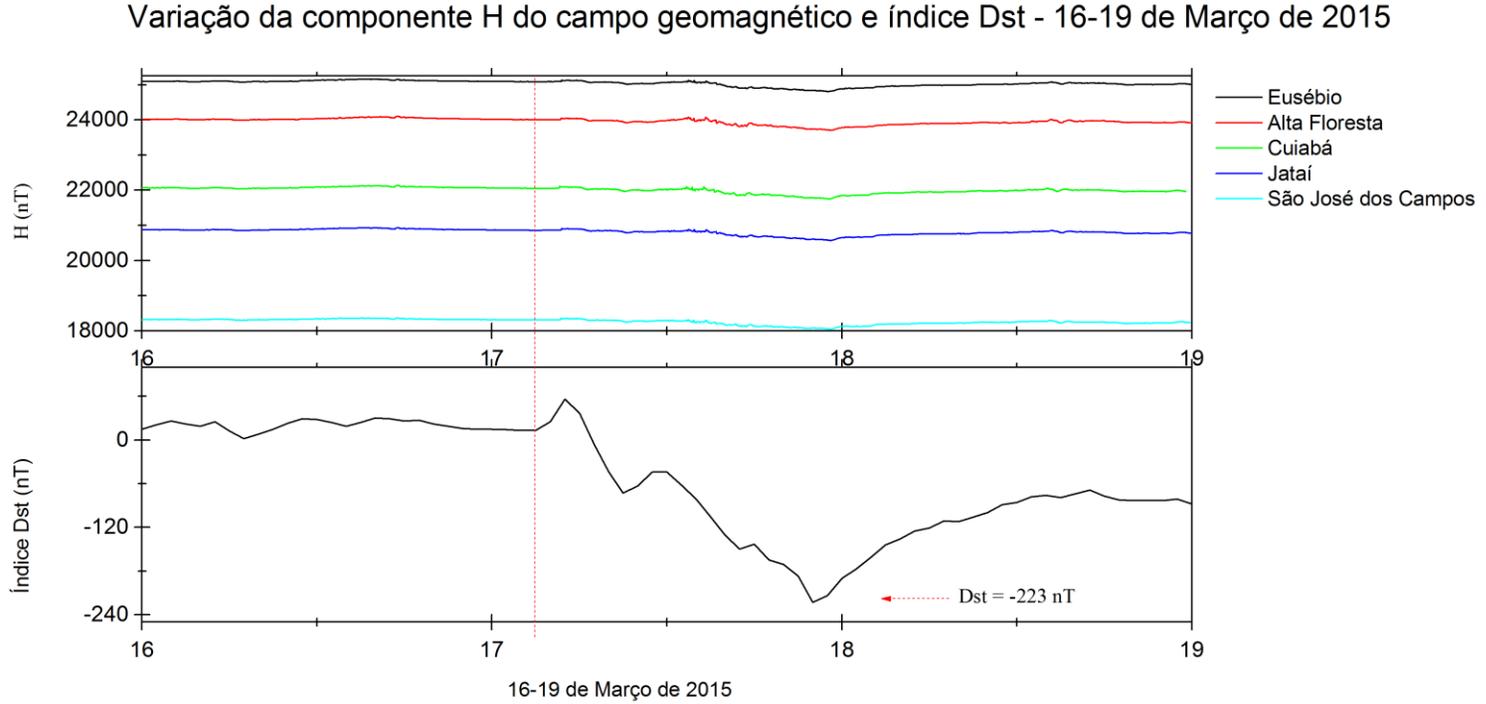


Figura 4.10 - Variação da componente H do campo geomagnético seguido do índice Dst, onde está indicado o mínimo valor atingido.



Para completar a descrição da variação latitudinal do campo geomagnético nas estações de magnetômetros, foram encontradas as mínimas variações da componente H para cada estação no dia 17 de Março de 2015. A Figura 4.11 exibe no eixo vertical o valor mínimo registrado para cada observatório, e no eixo horizontal a inclinação média do campo geomagnético de cada observatório. O resultado mostra que o mínimo valor da componente H é encontrado em São José dos Campos, com valores próximos de 18.000 nT com inclinação igual a 37.57° como é mostrado na Tabela 4.2.

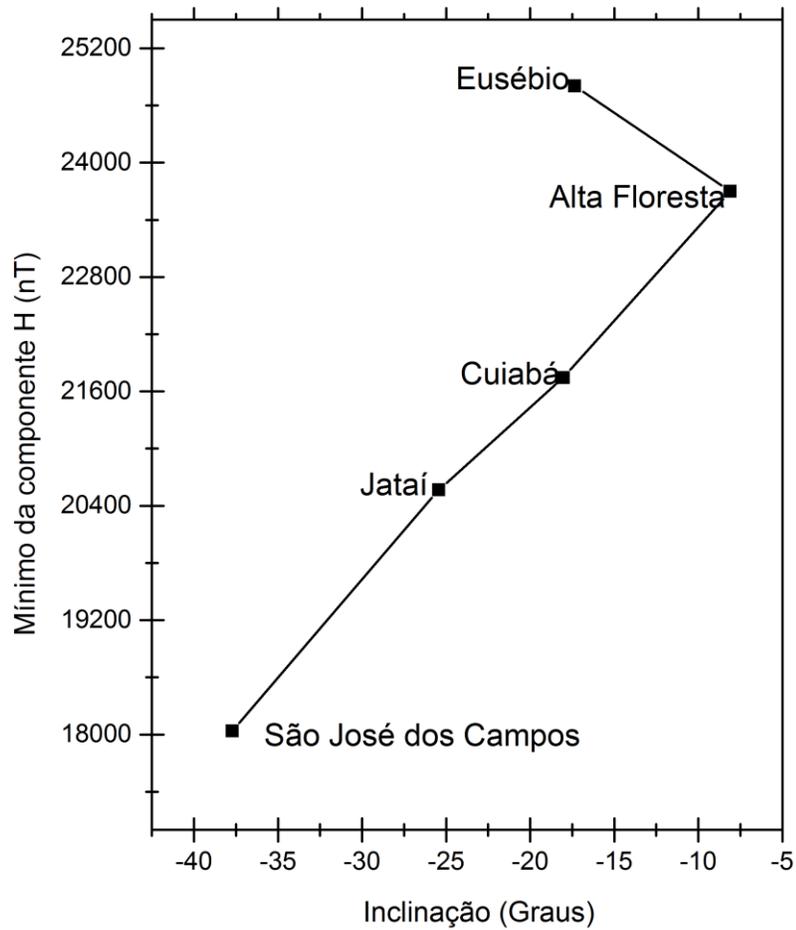
Tabela 4.2 - Tabela da inclinação e mínimo valor da componente H do campo geomagnético da tempestade de 17/03/2015.

Cidade	Inclinação (°)	Mínimo da componente H (nT)
Eusébio	-17,359	24.806
Alta Floresta	-8,104	23.699
Cuiabá	-18,033	21.744
Jataí	-25,437	20.566
São José dos Campos	-37,724	18.036

O mínimo valor da componente H durante a tempestade das cidades é menor quanto maior for a latitude, ou seja, mais perto do equador o menor valor foi ≈ 24.800 nT enquanto que nas latitudes de São José dos Campos o menor valor foi de ≈ 18.000 nT.

Figura 4.11 - Gráfico do mínimo valor atingido na componente H do campo geomagnético versus a Inclinação média do campo geomagnético de cada cidade.

Tempestade geomagnética de 17 de Março de 2015



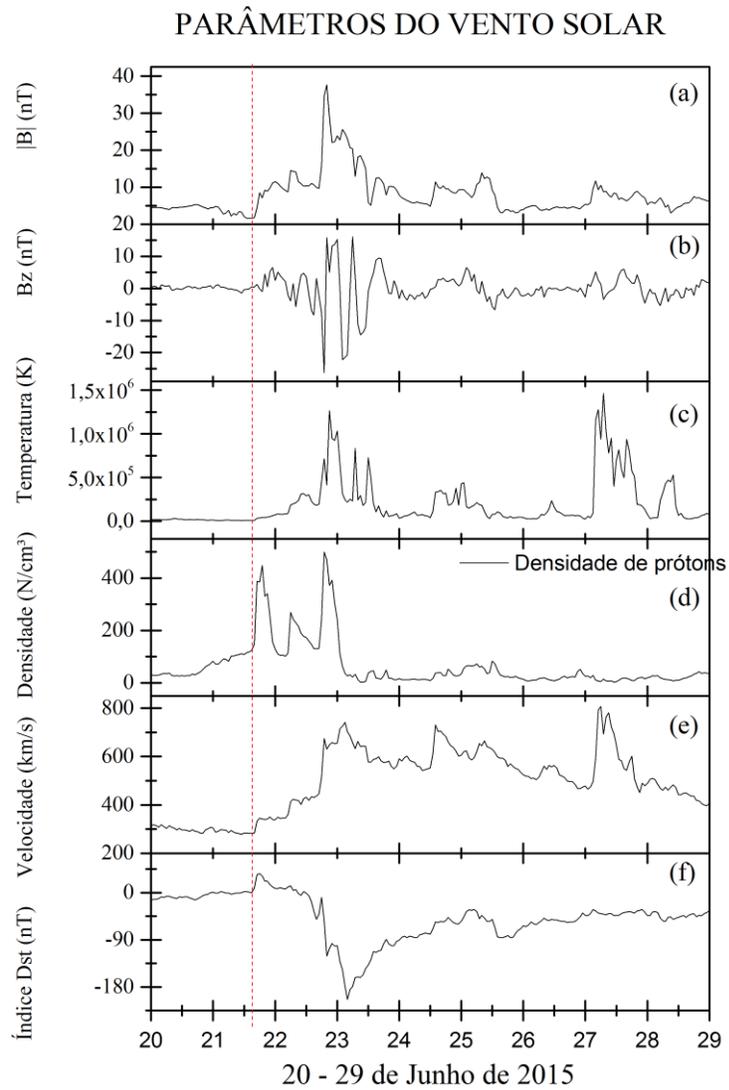
4.3 RESULTADOS: TEMPESTADE GEOMAGNÉTICA DE 22/06/2015

O terceiro e último evento a ser estudado é a tempestade geomagnética que ocorreu no dia 22 de Junho de 2015. A Figura 4.12 mostra os parâmetros do vento solar, e o índice Dst. A linha vermelha tracejada marca o início da tempestade geomagnética. Logo após o início da tempestade, o módulo do campo magnético (a) oscila por volta de 10 nT até o momento de um pico de intensidade de ≈ 35 nT, e no mesmo momento do pico as outras propriedades variam. Em (b) a componente Z do IMF oscila entre ≈ 10 e -20 nT, em (c) a temperatura sobe até 1×10^6 K e permanece por algumas horas. Na densidade (d), é possível identificar dois picos menores e um pico maior. Os picos menores podem estar associados ao SC (*Sudden commencement*) na fase inicial da tempestade, e o maior pico é onde inicia a fase principal da tempestade, nas primeiras horas do dia 23 de Junho, como é possível verificar em (f) no índice Dst. E por fim, a velocidade do vento solar aumenta de ≈ 300 para ≈ 750 km/s durante a fase principal da tempestade geomagnética.

Da mesma forma que para as outras duas tempestades geomagnéticas, as Figuras 4.13, 4.14, e 4.15 mostram variação do módulo do campo geomagnético, a variação da componente vertical Z e a componente horizontal com o índice Dst, e as fases da tempestade geomagnética, respectivamente.

Observa-se na Figura 4.13 que o maior valor do módulo foi registrado em Rio Grande (Argentina) de ≈ 31.302 nT, e o menor em São José dos Campos com ≈ 22.876 nT. A maior variação do módulo foi de $\approx 524,2$ nT em Cuiabá, maior variação obtida nas análises das três tempestades geomagnéticas.

Figura 4.12 - Parâmetros do vento solar medidos pelo satélite ACE entre os dias 20 e 29 de Junho de 2015: (a) Módulo do IMF, (b) componente Z do IMF (c) Temperatura, (d) Densidade de prótons, e (f) Índice Dst.



A variação da componente Z do campo geomagnético é apresentado na Figura 4.14 juntamente com o índice Dst. A componente Z foi maior em Alta Floresta de ≈ -3.378 nT e também obteve a maior variação de $\approx 174,9$ nT. O menor valor de ≈ -24.058 nT foi registrado em Rio Grande.

A próxima componente a ser exibida na Figura 4.15 é a componente H do campo geomagnético. Para a tempestade geomagnética de 22 de Junho de 2015, foi registrado -204 nT de valor mínimo do índice Dst, o que categoriza a tempestade geomagnética como intensa. O maior valor atingido foi em Alta Floresta de aproximadamente 24.105 nT. O menor valor em Vassouras de ≈ 17.896 nT. A maior variação foi em Cuiabá, variando ≈ 509 nT.

Por fim a Figura 4.16 mostra a da inclinação e mínimo valor da componente H do campo geomagnético. É evidente o decréscimo da componente H e da inclinação média do vetor campo geomagnético. O menor valor atingido foi em Vassouras, de 17.896 nT como reitera a Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Tabela da inclinação e mínimo valor da componente H do campo geomagnético da tempestade de 22/06/2015.

Cidade	Inclinação (°)	Mínimo da componente H (nT)
Alta Floresta	-8,155	23.769
Cuiabá	-17,922	21.805
Jataí	-37,080	18.214
Vassouras	-39,162	17.896
Cachoeira Paulista	-36,449	18.438
São José dos Campos	-37,753	18.087
Rio Grande	-50,058	19.954

Figura 4.13 - Variação do módulo do campo geomagnético seguido do índice Dst, onde está indicado as fases da tempestade geomagnética.

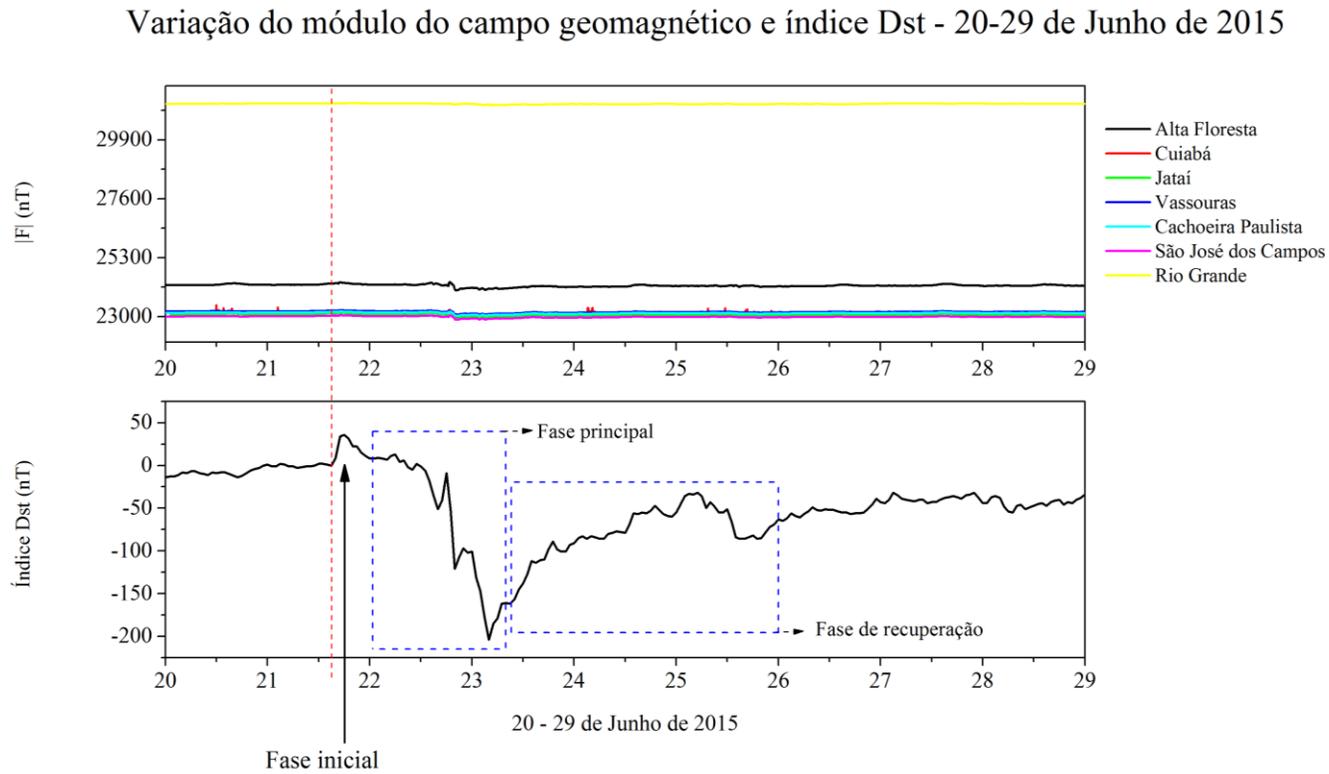


Figura 4.14 - Variação da componente Z do campo geomagnético de cada cidade.

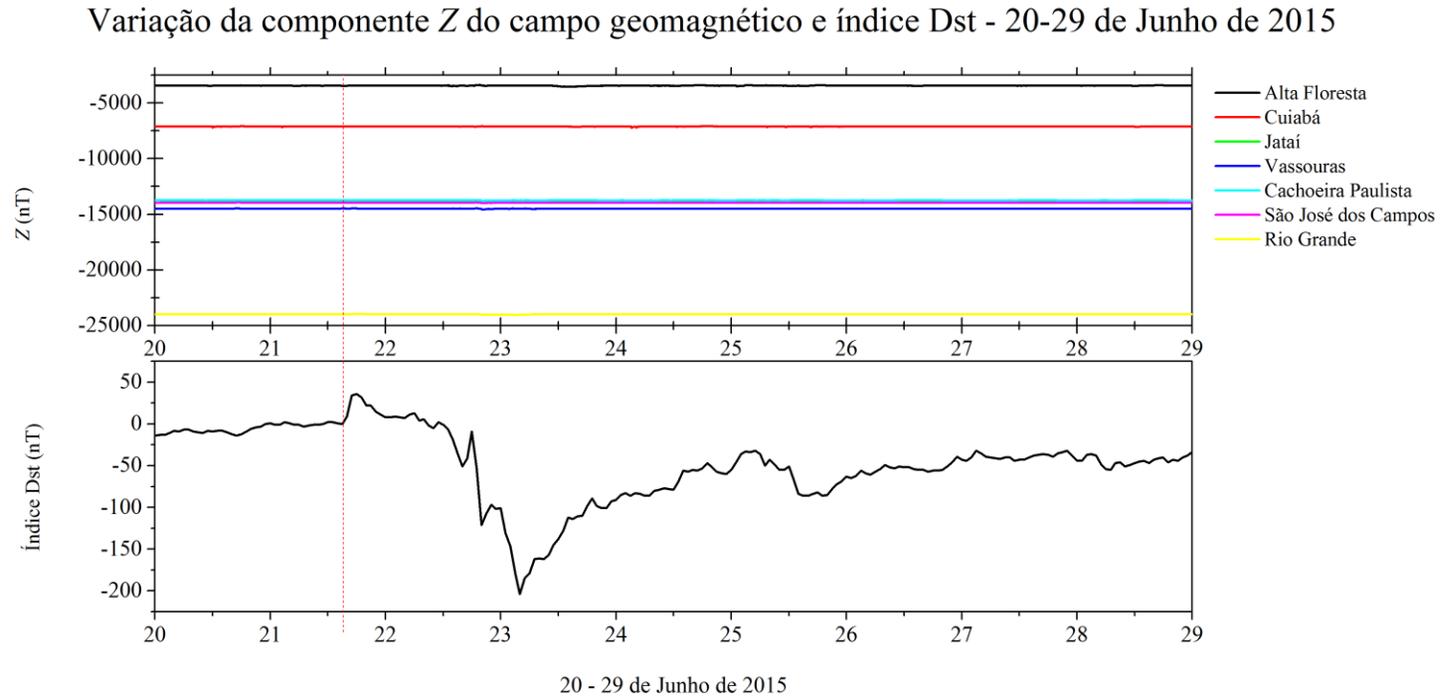


Figura 4.15 - Variação da componente H do campo geomagnético seguido do índice Dst, onde está indicado o mínimo valor atingido.

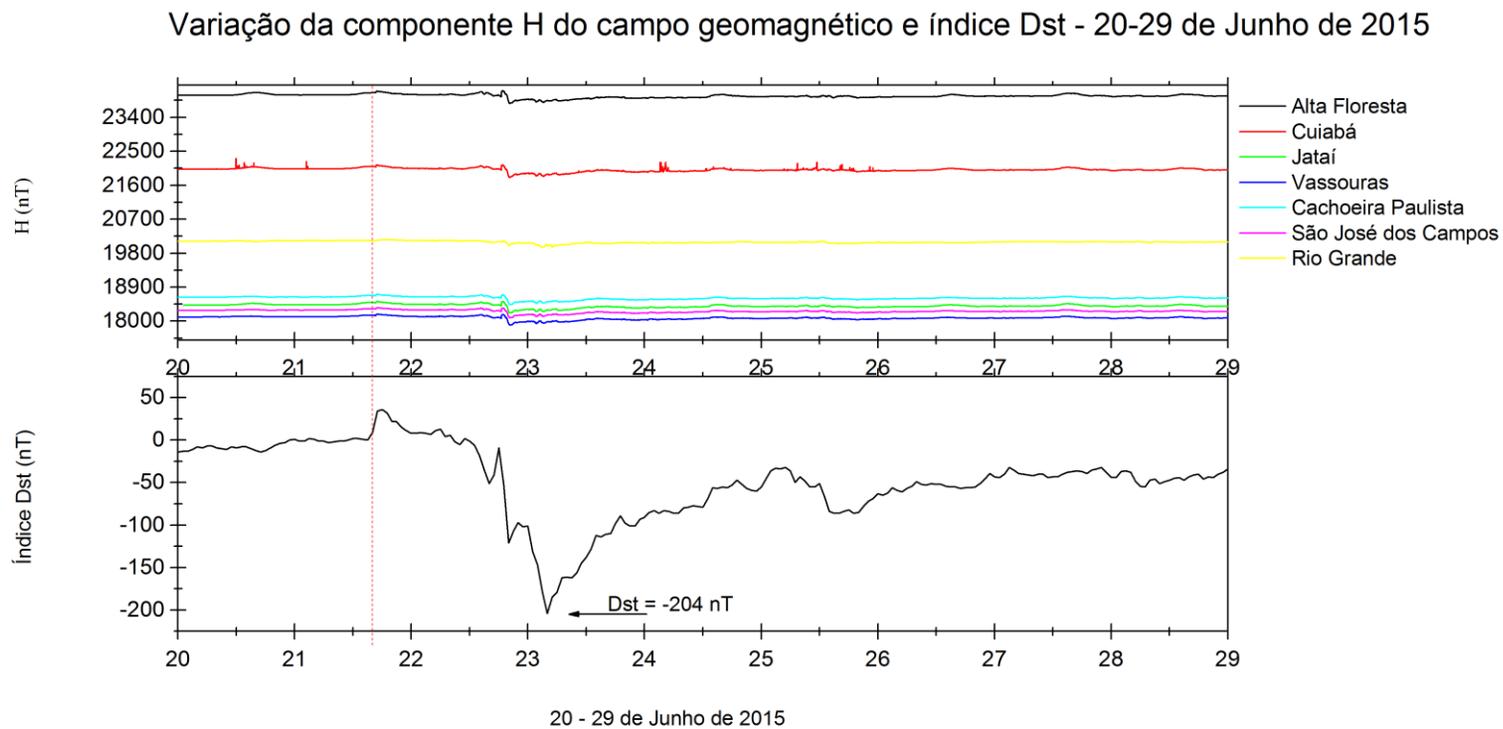
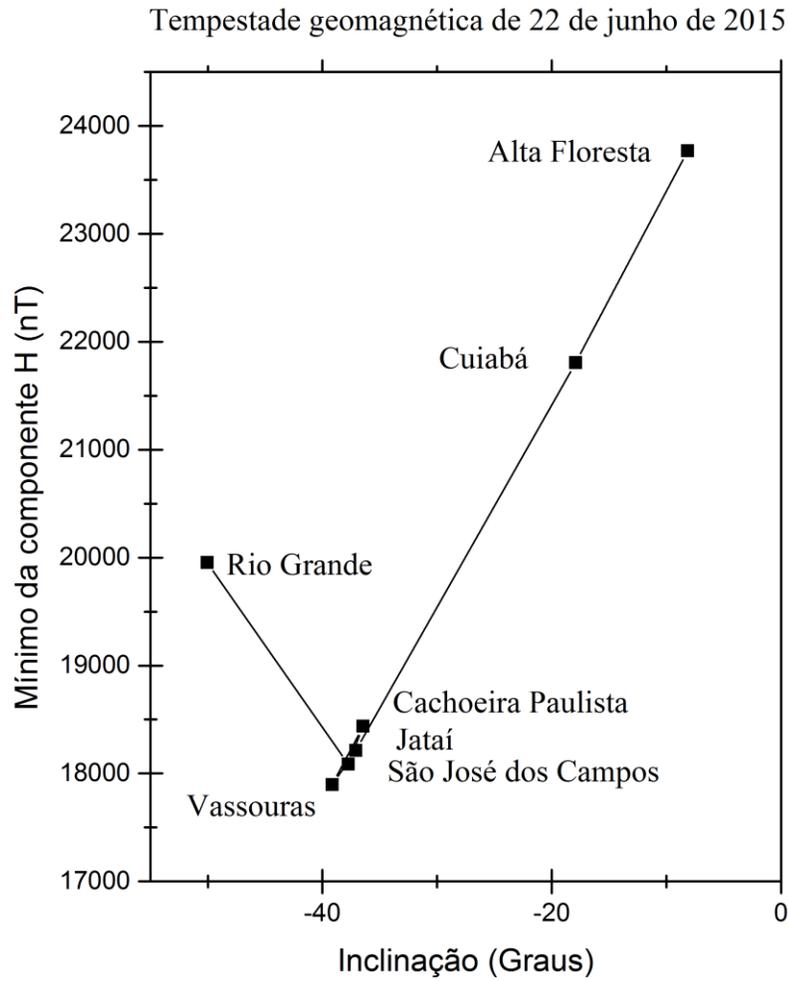


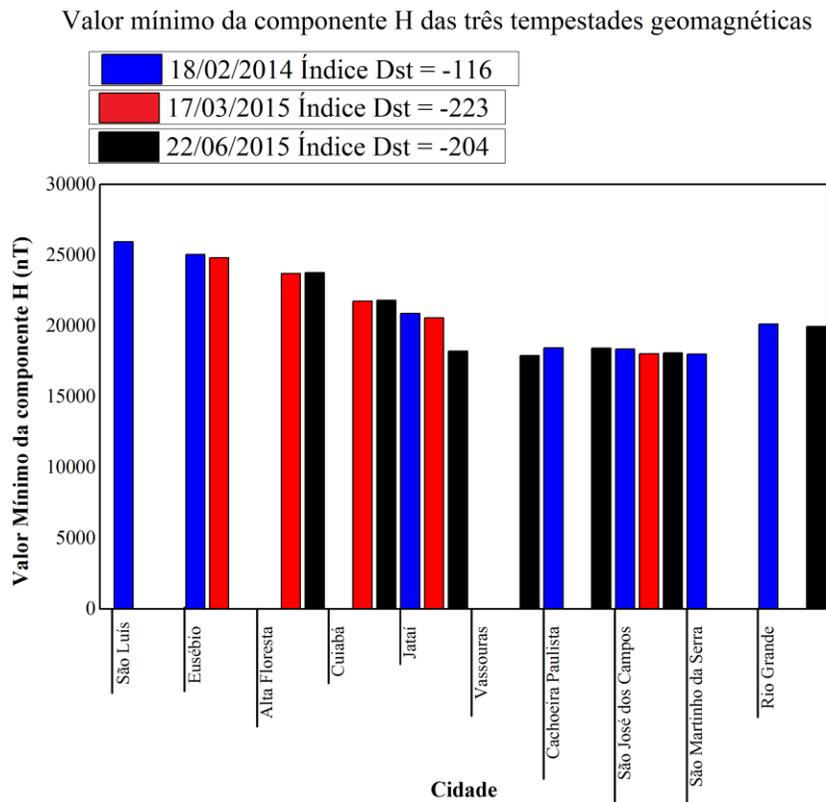
Figura 4.16 - Gráfico do mínimo valor atingido na componente H do campo geomagnético versus a Inclinação média de cada cidade.



4.4 DISCUSSÕES DOS RESULTADOS

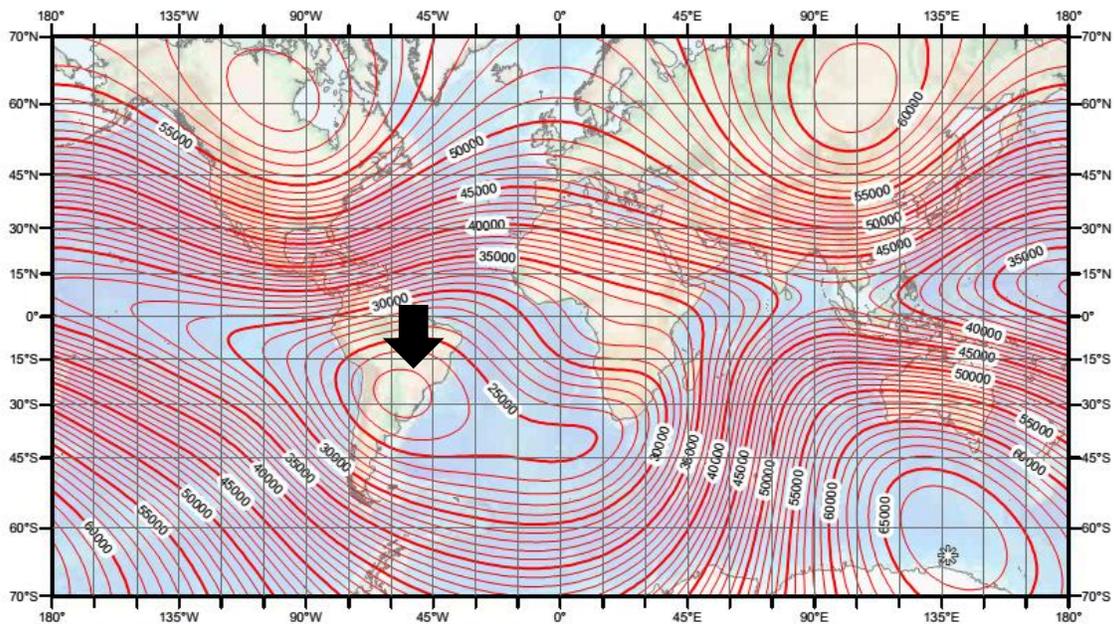
A análise dos dados das três tempestades estão condensados na forma do histograma da Figura 4.17, que indica o valor mínimo da componente H das tempestades que foram registradas em cada cidade. O menor valor da componente H registrado foi de 17.896 nT em Vassouras (RJ) no dia 23 de Junho de 2015.

Figura 4.17 - Histograma do valor mínimo da componente H de cada estação, e em cada tempestade geomagnética.



No histograma da Figura 4.17 (e nas Figuras 4.6, 4.11 e 4.16) as estações estão posicionadas conforme a inclinação magnética (e conseqüentemente latitude), sendo São Luís a cidade mais próxima do equador. Diante disso, pode-se notar que ao se afastar da região equatorial, o valor da componente H decresce até o valor mínimo observado em São Martinho da Serra, que é a região central da AMAS. Em Rio Grande, o mínimo da componente H se tornou maior, por que o módulo do campo geomagnético lá é maior, está mais afastado da região da AMAS. Essa fato é explicado com o auxílio da Figura 4.18, em que há uma seta preta que indica para onde a intensidade do campo diminui, bem como a região da AMAS que possui o menor valor de $|F|$.

Figura 4.18 - Mapa da intensidade do campo geomagnético.



Fonte: Modificada de Maus et al. (2010).

Portanto Rio Grande está na borda de um vale de intensidade, na qual Jataí encontra-se aproximadamente na outra borda. As duas estações estão aproximadamente equidistantes do centro da AMAS, e os mínimos valores atingidos durante as tempestades registradas foram próximos.

4.5 ATIVIDADES ADICIONAIS REALIZADAS PELO BOLSISTA

Além das atividades descritas pelo Bolsista nas seções anteriores, ele também é responsável pela manutenção do magnetômetro da Rede MAGDAS-5, que conta com uma estação em São Martinho da Serra, que foi instalado em parceria com a Universidade de Kyushu do Japão.

Dentre as atividades necessárias para a manutenção desse magnetômetro estão: a troca de cartões de memória onde os dados são armazenados, e manutenção no cartão de sistema. O Bolsista utiliza da viatura do CRS/INPE para realizar viagens a São Martinho da Serra para a manutenção.

Com relação à participação de escolas sobre os tópicos relevantes ao projeto, bem como palestras, conferências e no desenvolvimento de trabalhos científicos condizente com seu nível de aprendizado, o Bolsista já realizou as inscrições na Jornada Acadêmica Integrada (JAI) da Universidade Federal de Santa Maria, e também no Seminário de Iniciação Científica e Iniciação em Desenvolvimento Tecnológico e Inovação (SICINPE). Os resumos enviados para efetuar as inscrições na JAI/UFSM e SICINPE/INPE estão em anexo (Seção 7.2). O Bolsista também pretende participar do VI Simpósio Brasileiro de Geofísica Espacial e Aeronomia (SBGEA), que será realizado em Jataí, estado de Goiás, na Regional de Jataí da Universidade Federal de Goiás (UFG).

5 CONCLUSÕES

Nesse trabalho foi obtida a qualificação do Bolsista nas áreas do desenvolvimento científico e tecnológico relacionado às Ciências Espaciais e Atmosféricas. As revisões bibliográficas com ênfase na relação Sol-Terra, que inclui magnetosfera, ionosfera e geomagnetismo foram realizadas de forma aprofundada com base em Teses, Dissertações, livros e artigos científicos nacionais e internacionais. Os dados dos magnetômetros do Programa de Estudos e Monitoramento Brasileiro do Clima Espacial (Embrace) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE/MCTIC foram analisados por meio de softwares de análise e visualização de dados. Isso foi de grande importância para o aprendizado científico do Bolsista, que agora se encontra apto para realizar a confecção de artigos científicos no futuro.

Os resultados são baseados na análise de três tempestades geomagnéticas, classificadas como intensas segundo o índice Dst, que ocorreram em 18 de Fevereiro em 2014, 17 de Março de 2015 e 22 de Junho de 2015. Foram analisados dados dos magnetômetros instalados em São Luís do Maranhão/MA (SLZ), Eusébio/CE (EUS), Alta Floresta/MS (ALF), Cuiabá/MT (CBA), Jataí/GO (JAT), Vassouras/RJ (VSS), Cachoeira Paulista/SP (CXP), São José dos Campos/SP (SJC), São Martinho da Serra/RS (SMS) e Rio Grande (RGA), na Argentina.

Os resultados obtidos com a tempestade geomagnética que ocorreu entre os dias 17 e 21 de Fevereiro de 2014 mostram que o maior valor de $|F|$ é observado em Rio Grande, na Argentina, com intensidade de ≈ 31.402 nT. O menor valor de $|F|$ é observado em São Martinho da Serra, com intensidade de ≈ 22.499 nT, que coincide com a região central da Anomalia Magnética da América do Sul (AMAS). A intensidade da componente Z também foi maior em Rio Grande, enquanto que o menor valor foi registrado em São Luís do Maranhão. Na componente H , o menor valor foi de ≈ 18.005 nT em São Martinho da Serra, e o maior valor foi de ≈ 31.402 nT em São Luís.

Para a tempestade geomagnética que ocorreu entre os dias 3 e 23 de Março, as estações consideradas são diferentes das consideradas na análise da tempestade anterior. Nesse caso, o maior valor do módulo do campo geomagnético foi observado em Eusébio, de ≈ 26.366 nT. A menor intensidade é observada em Jataí, com ≈ 22.744 nT. A componente Z do campo geomagnético foi maior e, Alta Floresta, de ≈ -3.284 nT. Em São José dos Campos foi registrado o menor valor de ≈ -13.284 nT. O maior valor da componente H foi observado em São Luís, de ≈ 31.402 nT, enquanto que o menor valor da componente H foi em São José dos Campos de ≈ 18.036 nT.

Por fim, a tempestade geomagnética que ocorreu no dia 22 de Junho de 2015 mostra que o maior valor do módulo foi registrado em Rio Grande, de ≈ 31.302 nT, e o menor em São José dos Campos, com ≈ 22.876 nT. A componente Z foi maior em Alta Floresta de ≈ -3.378 nT, e o menor valor de ≈ -24.058 nT foi registrado em Rio Grande. Com relação a componente H , o maior valor atingido foi em Alta Floresta de ≈ 24.105 nT. O menor valor em Vassouras de ≈ 17.896 nT.

Os resultados obtidos com as tempestades geomagnéticas revelam que quanto maior a redução do índice Dst durante a tempestade geomagnética, maior será a redução na componente H do campo geomagnético medido pelos magnetômetros da Rede Embrace. O que comprova esse fato são as medidas dos valores mínimos da componente H para a mesma região nas três tempestades. Por exemplo, São José dos Campos registrou as três tempestades cujo índice Dst foi de: -116 nT, -204 nT, -223 nT e os mínimos da componente H foram: 18.362 nT, 18.087 nT, 18.036 nT respectivamente. Tendo essas informações, conclui-se que quanto mais intensa for a tempestade geomagnética, mais a componente H será reduzida, e as regiões com o campo geomagnético menos intenso sofrem maiores variações durante as fases do fenômeno.

Finalmente, pode-se afirmar que o Bolsista adquiriu habilidades para trabalhar com os dados científicos de magnetômetros, tendo feito as análises minuciosas das tempestades geomagnéticas. Com isso, o Bolsista estará apto para as próximas atividades referentes ao Projeto, que estão relacionadas com a utilização de modelos empíricos e comparação com os dados científicos obtidos com o magnetômetro XEN-1210 do Programa NANOSATC-BR1.

6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDU, M. A.; BATISTA, I. S.; CARRASCO, A. J.; BRUM, C. G. M. South atlantic magnetic anomaly ionization: A review and a new focus on electrodynamic effects in the equatorial ionosphere. *Journal of Atmospheric, Solar and Terrestrial Physics*, v. 67, p. 1643–1657, 2005.

ANTUNES, C. E. Desenvolvimento de sistema eletrônico para magnetômetro, Relatório final de atividades de graduação da Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, 2009

AMARANTE, J. Tópicos gerais sobre geomagnetismo e estudos sobre a ocorrência de micropulsões em São José dos Campos, 1967.

BALMACEDA, L. Estudo das possíveis causas solares de tempestades geomagnéticas, 2003.

BITTENCOURT, J. A., *Fundamentals of plasma physics*, second edition, São José dos Campos – SP, 1978.

BITTENCOURT, J. A., *Física da Ionosfera*, São José dos Campos – SP, 1978.

CRUZ, F., MARINELLI, J., MORAES, M. (Abril de 1989). FUSÃO NUCLEAR EM PLASMA. *Caderno Catarinense de Ensino em Física*. Florianópolis, pp. 59-74.

DENARDINI, C. M. et al. The initial steps for developing the South American K index from the embrace magnetometer network. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 33, n. 1, p. 79-88, 2015.

EAD - Astrofísica Geral . (s.d.). Acesso em 08 às 14:50 de Setembro de 2015, disponível em Observatório Nacional: http://www.on.br/ead_2013/site/conteudo/cap18-sol/sol.html

GONZALEZ, W.; JOSELYN, J.; KAMIDE, Y.; KROEHL, H.; ROSTOKER, G.; TSURUTANI, B.; VASYLIUNAS, V. What is a magnetic storm? *Journal of Geophysical Research*, v. 99, p. 5771–5792, 1994.

HARGREAVES, J. K., *The solar-terrestrial environment*. Cambridge: Cambridge University Press, 1992.

KELLEY, M.C., *The Earth's Ionosphere. Plasma physics and electrodynamics* 1st ed. R. Dmowska & J. R. Holton, eds., San Diego, CA: Academic Press, 1989.

KIVELSON, M. G.; RUSSEL, C. T., *Introduction to space physics*. Cambridge: Cambridge University Press, 1995.

MARCHEZI, J. P., Diagnose de pulsações detectadas na Rede de magnetômetros do Embrace, Dissertação de Mestrado, INPE, São José dos Campos – SP, 2016.

MAUS, S., S. MACMILLAN, S. MCLEAN, B. HAMILTON, A. THOMSON, M. NAIR, AND C. ROLLINS, The US/UK World Magnetic Model for 2010-2015, NOAA Technical Report NESDIS/NGDC, 2015.

MORO, J., C. M. DENARDINI, M. A. ABDU, E. CORREIA, N. J. SCHUCH, K. MAKITA, Latitudinal dependence of cosmic noise absorption in the ionosphere over the SAMA region during the September 2008 magnetic storm, *Journal of Geophysical Research*, 117, A06311, doi: 10.1029/2011ja017405, 2012.

MORO J., Variações longitudinais dos campos elétricos do Eletrojato Equatorial no setor Americano, Tese de Doutorado, INPE, São José dos Campos – SP, 2015.

RISHBETH, H., GARRIOTT, O. K., Introduction to ionospheric physics. New York: Academic, 1969.

ROSTOKER, G. Geomagnetic indices. *Reviews of Geophysics and Space Physics*, v. 10, p. 935-950, 1972.

SCHUNK, R.W., Solar-terrestrial energy program: Handbook of ionospheric models 1st ed., Boulder, CO: SCOSTEP secretariat, 1996.

WATSON-WATT, R., Weather and wireless, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 55, 273, 1929.

7 ANEXOS

Nesta seção são apresentados os gráficos da variação do módulo do campo geomagnético, sua componente vertical, e horizontal, para cada uma das estações utilizadas no estudo, para as três tempestades geomagnéticas.

7.1 VARIAÇÕES DO CAMPO GEOMANGÉTICO OBSERVADAS NAS ESTAÇÕES

Figura 7.1 - Módulo $|F|$ do campo geomagnético de cada cidade durante a tempestade geomagnética de 18 de Fevereiro de 2014.

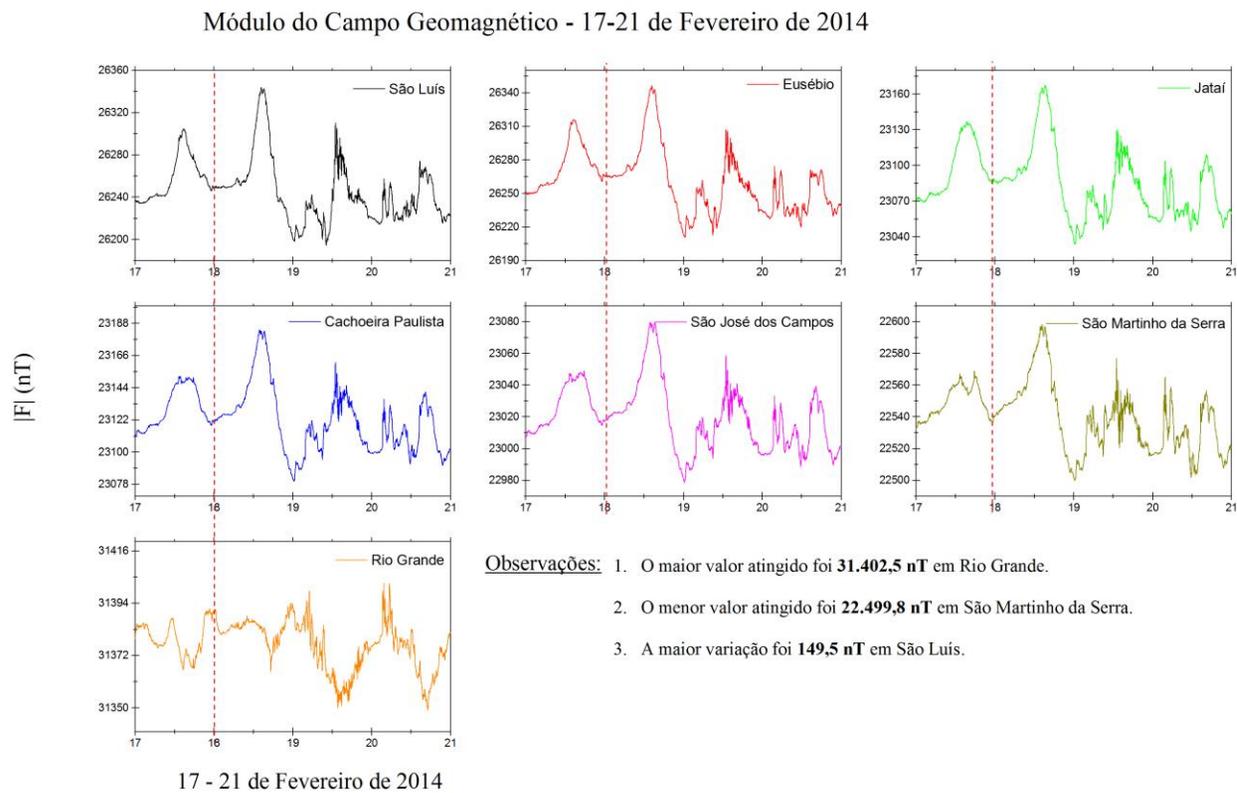


Figura 7.2 - Componente Z do campo geomagnético de cada cidade durante a tempestade geomagnética de Fevereiro de 2014.

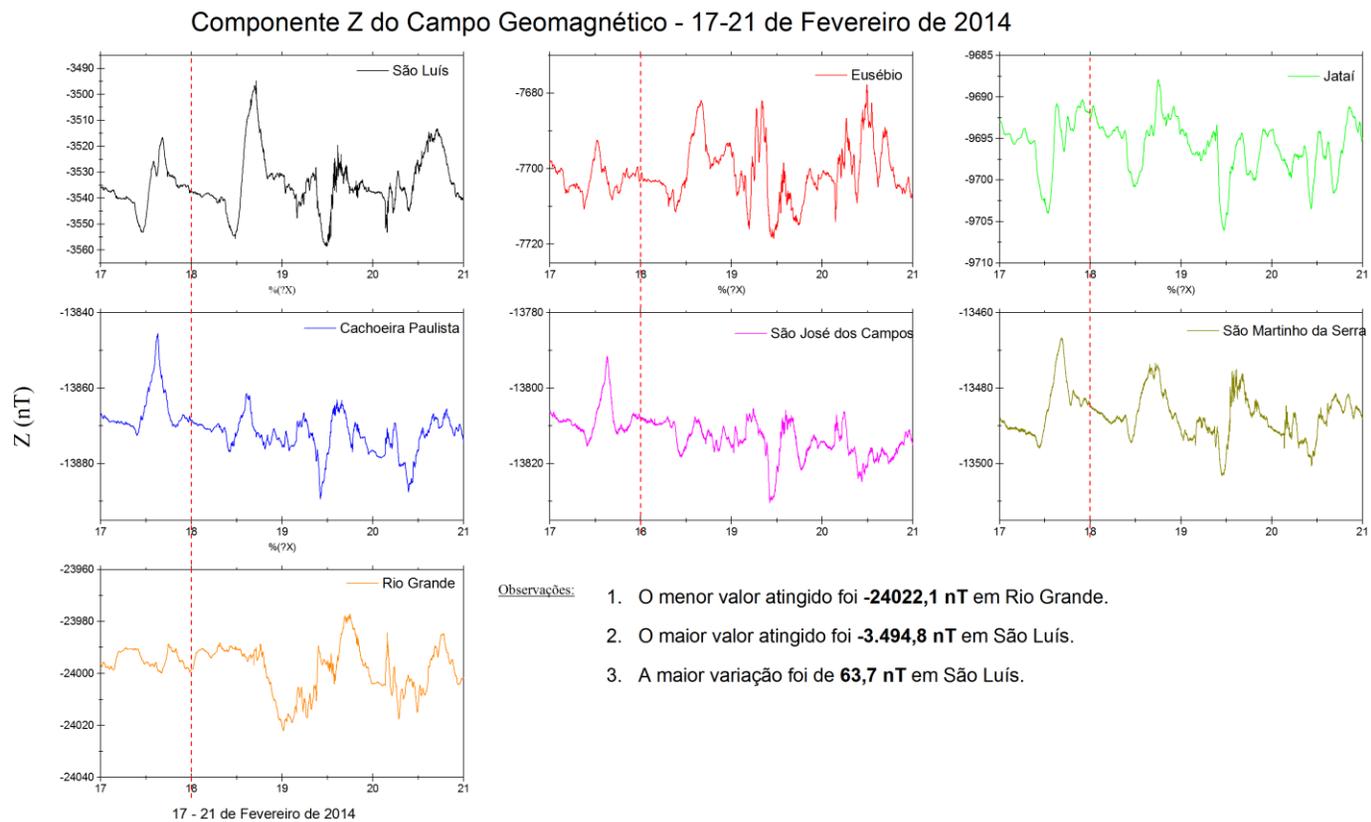


Figura 7.3 - Componente H do campo geomagnético de cada cidade durante a tempestade geomagnética de Fevereiro de 2014.

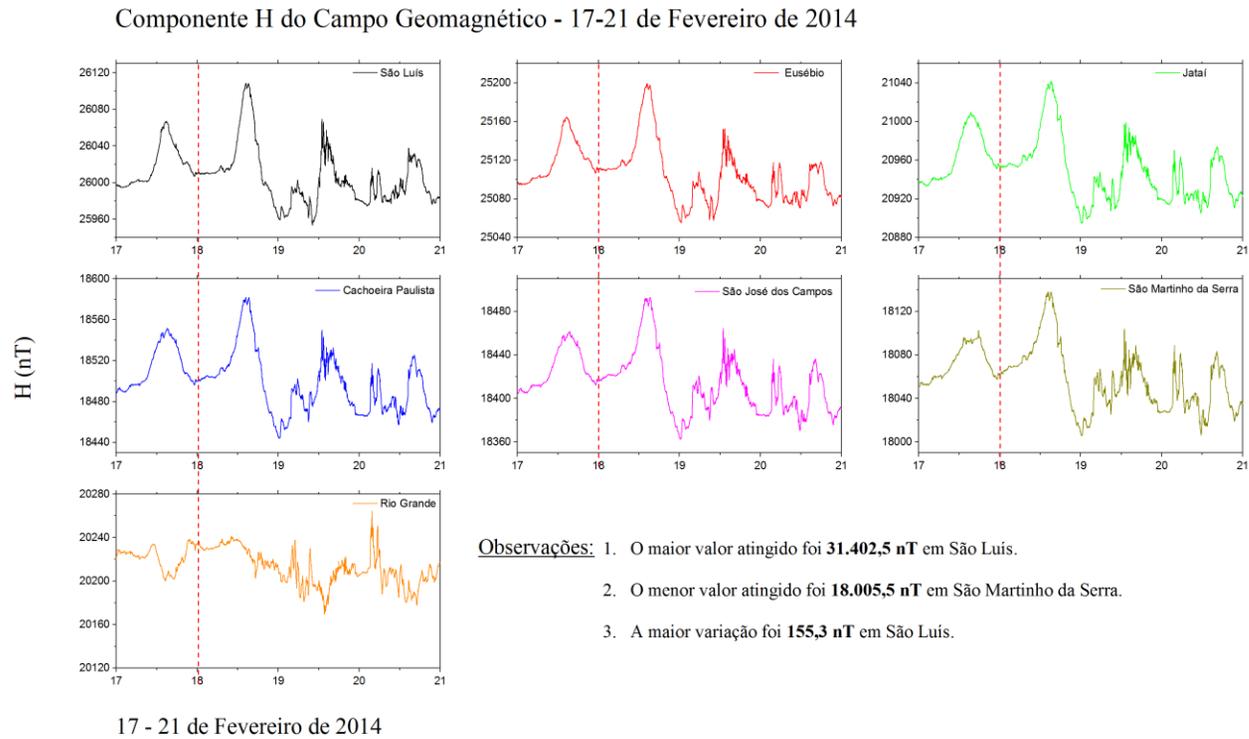


Figura 7.4 - Módulo $|F|$ do campo geomagnético de cada cidade durante a tempestade geomagnética de 17 de Março de 2015.

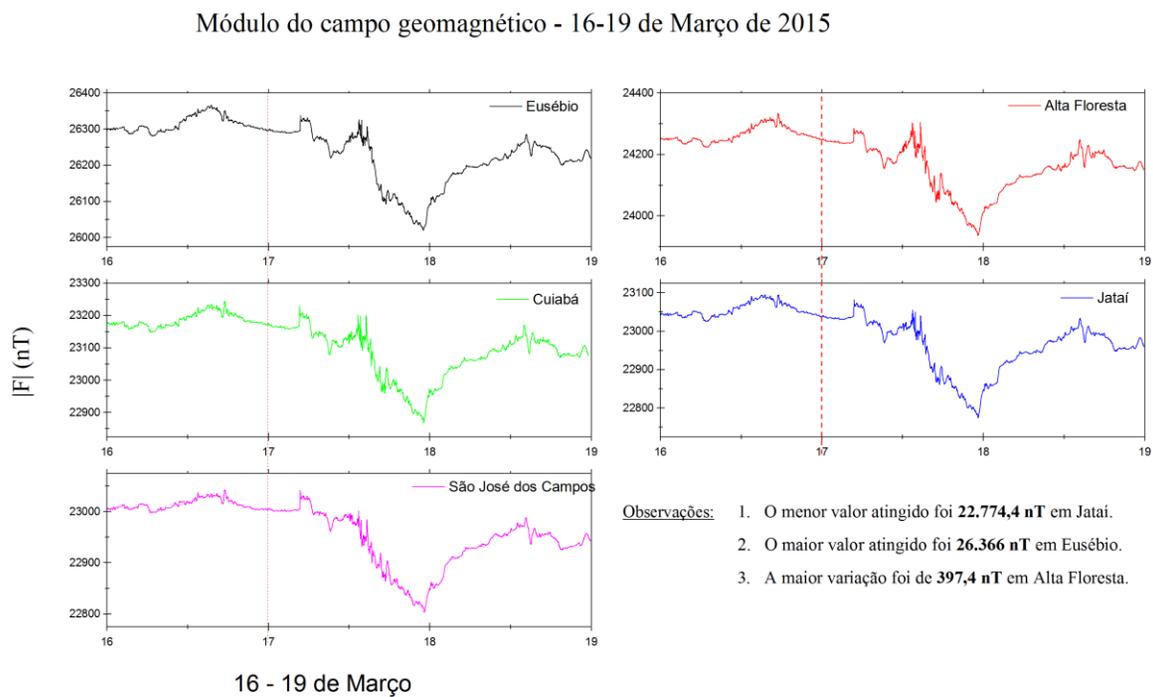


Figura 7.5 - Componente Z do campo geomagnético de cada cidade durante a tempestade geomagnética de 17 de Março de 2015.

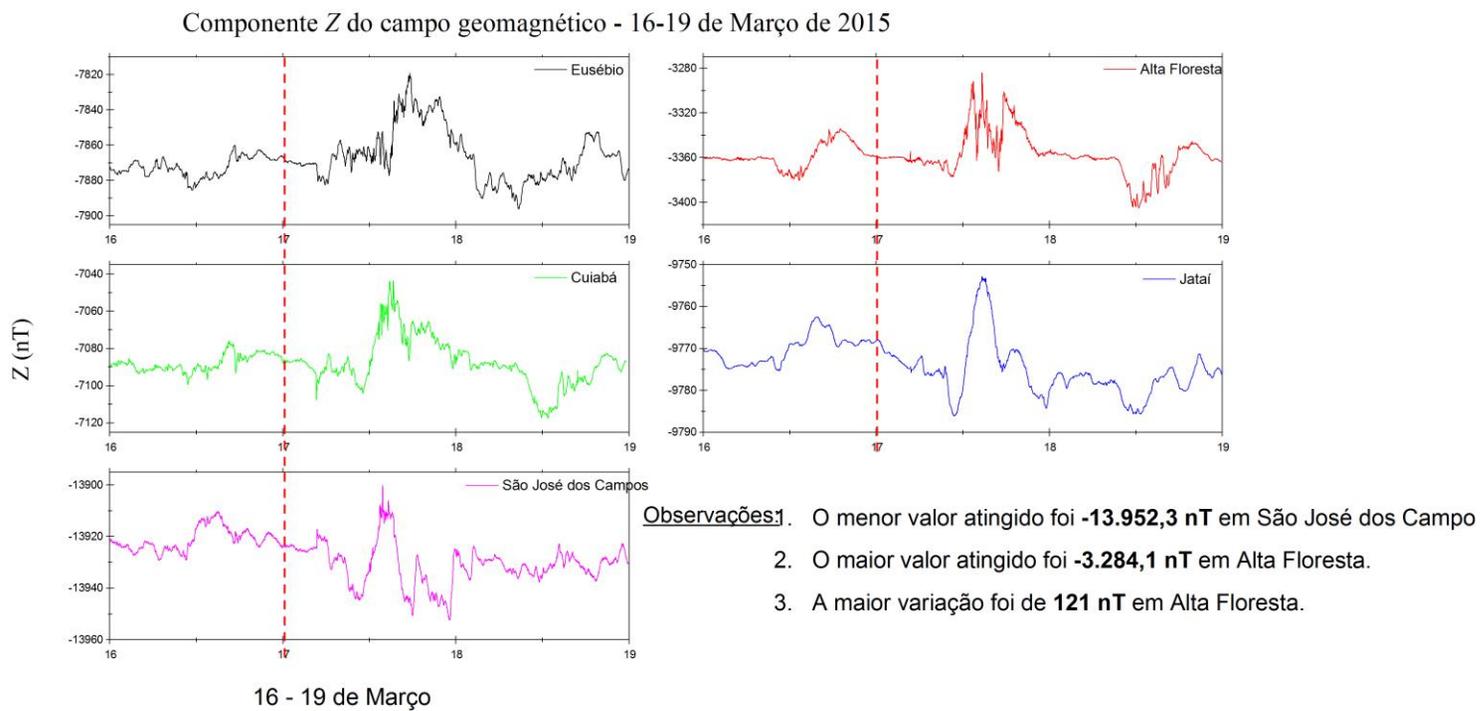


Figura 7.6 - Componente H do campo geomagnético de cada cidade durante a tempestade geomagnética de 17 de Março de 2015.

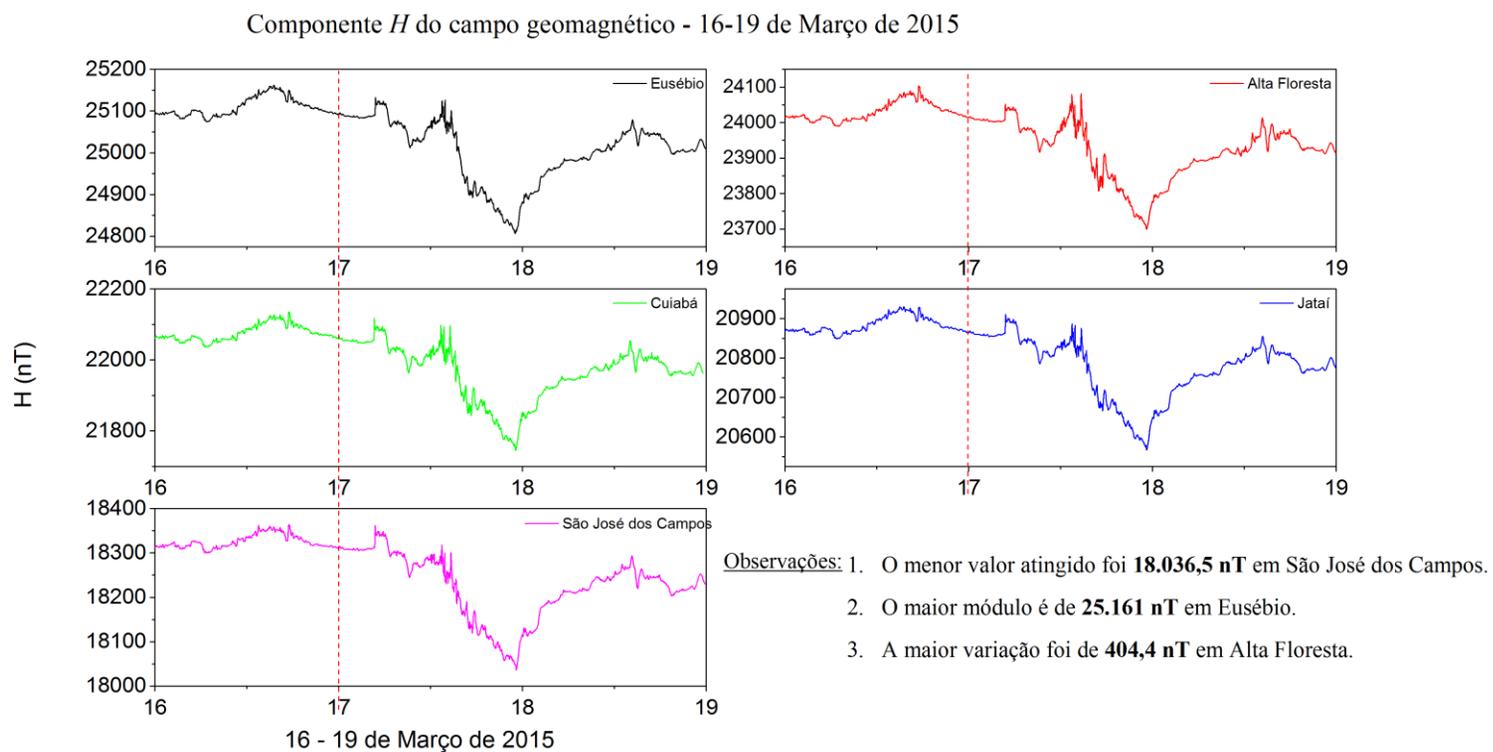


Figura 7.7 - Módulo $|F|$ do campo geomagnético de cada cidade durante a tempestade geomagnética de 22 de Junho de 2015.

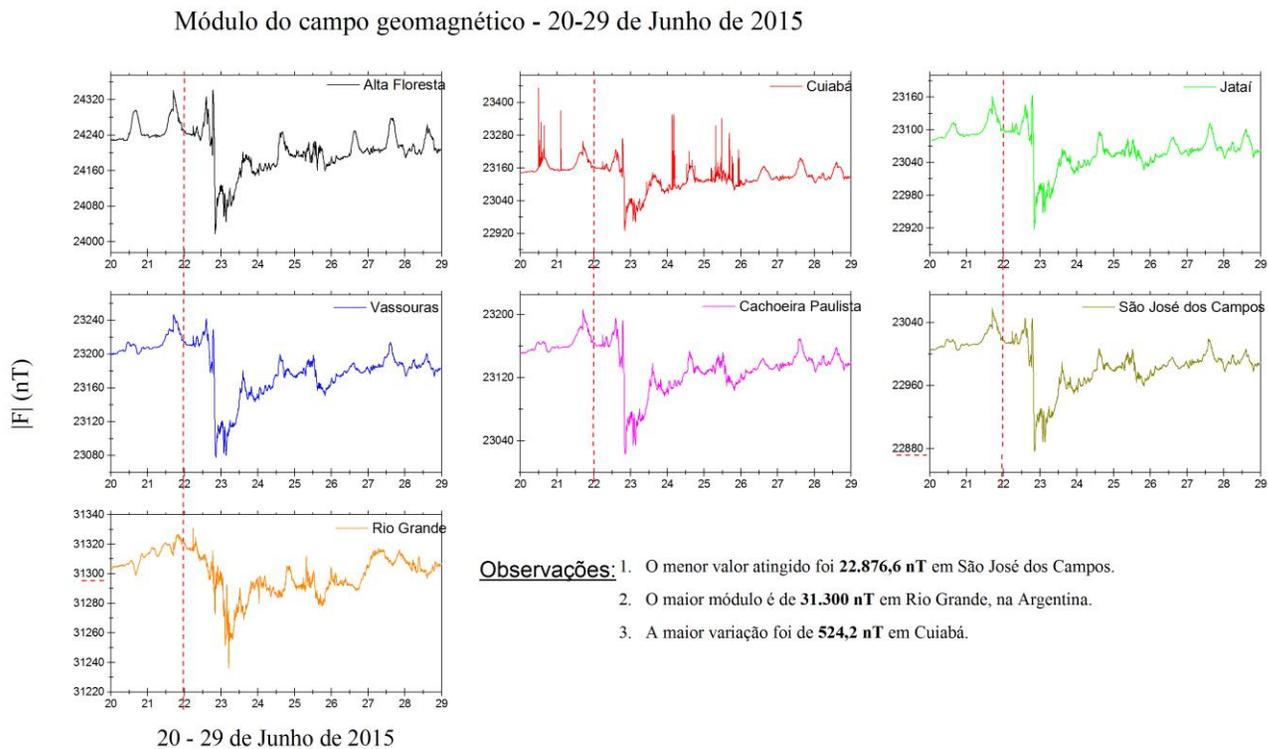


Figura 7.8 - Componente Z do campo geomagnético de cada cidade durante a tempestade geomagnética de 22 de Junho de 2015.

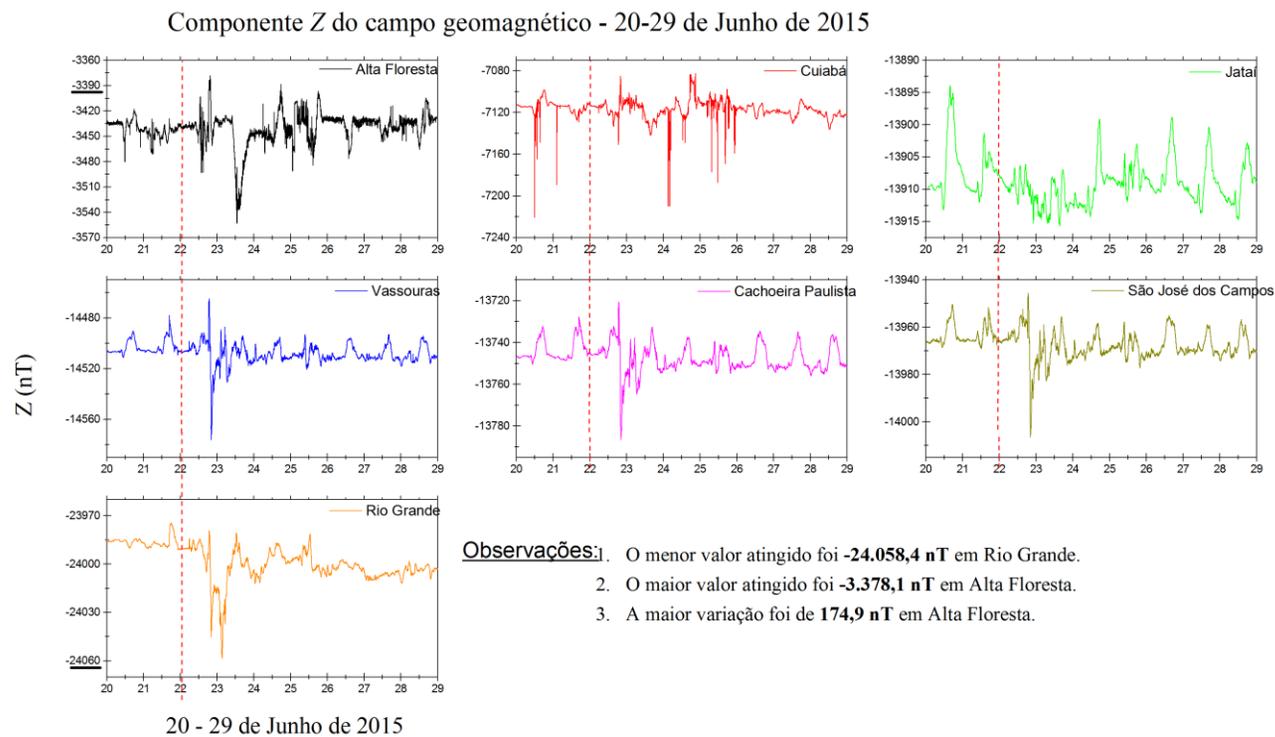
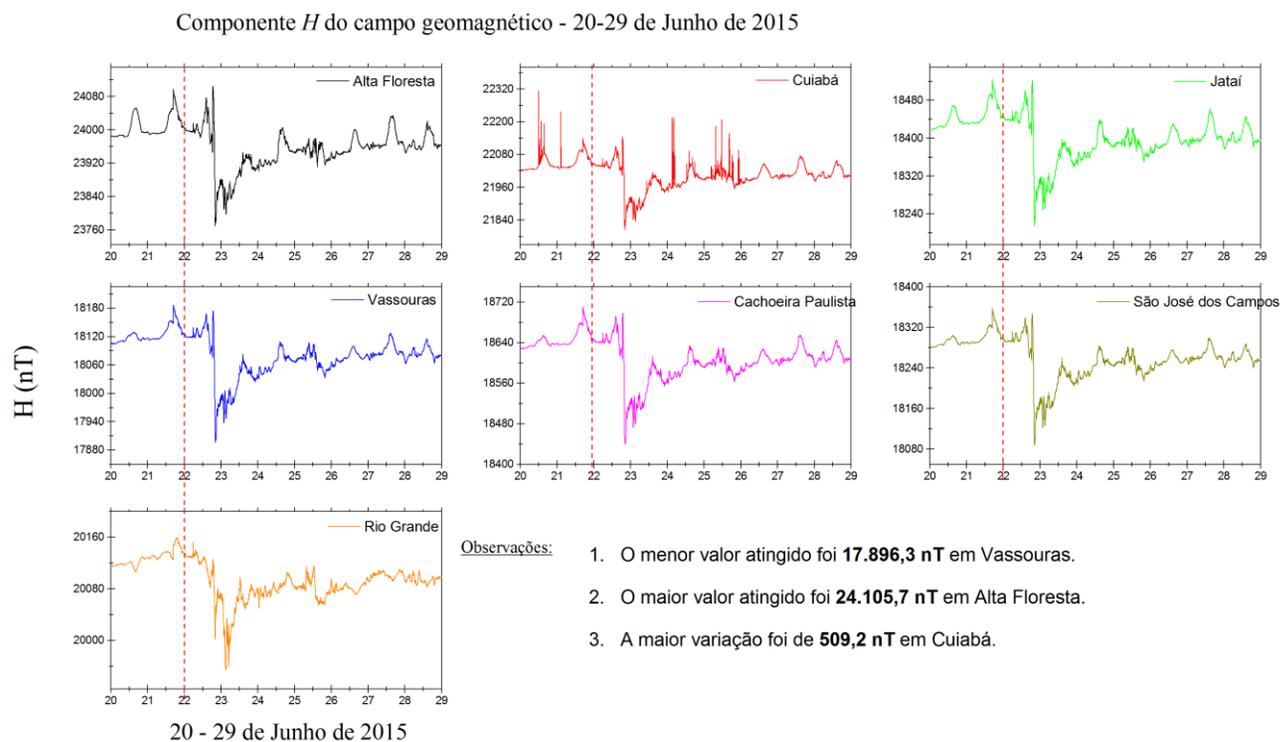


Figura 7.9 - Componente H do campo geomagnético de cada cidade durante a tempestade geomagnética de 22 de Junho de 2015.



7.2 RESUMOS SUBMETIDOS EM CONGRESSOS

A seguir, encontram-se os resumos já submetidos em congressos para divulgação científica dos resultados preliminares do projeto.

O Bolsista submeteu o primeiro trabalho intitulado “ESTUDO DE INTENSAS TEMPESTADES GEOMAGNÉTICAS COM DADOS DOS MAGNETÔMETROS DA REDE Embrace” para a 31ª Jornada Acadêmica Integrada (JAI) da Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, que será realizada de 17 a 21 de outubro de 2016 no campus da UFSM, em Santa Maria – RS.

O segundo resumo submetido é para o Seminário de Iniciação Científica e Iniciação em Desenvolvimento Tecnológico e Inovação do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE/MCTIC, que será realizado de 25 a 26 de Julho de 2016 no Auditório Fernando de Mendonça, em São José dos Campos – SP. O título do resumo é “ANÁLISE COMPARATIVA DOS DADOS DE MAGNETÔMETROS DO NANOSATC-BR1 COM DADOS DE MAGNETÔMETROS DE SOLO”.

Um terceiro resumo está sendo preparando pelo Bolsista para o VI Simpósio Brasileiro de Geofísica Espacial e Aeronomia – SBGEA, que ocorrerá em Jataí, estado de Goiás, na Regional de Jataí da Universidade Federal de Goiás (UFG).



ESTUDO DE INTENSAS TEMPESTADES GEOMAGNÉTICAS COM DADOS DOS MAGNETÔMETROS DA REDE EMBRACE

Schultz, Vitor V.¹(IC); Denardini, Clezio M.²(O); Moro, Juliano³(CO);
Schuch, Nelson J.³(CO)

¹*Departamento de Física, Universidade Federal de Santa Maria;* ²*Divisão de Aeronomia, INPE;* ³*Centro Regional Sul de Pesquisas espaciais;*

A ocorrência de grandes tempestades geomagnéticas está associada, essencialmente, às Ejeções de Massa Coronal (CMEs), o que intuitivamente acreditamos ocorrer com maior frequência em períodos de máxima atividade solar. Atualmente, o Sol está em um período de baixa atividade solar, caracterizado por um número reduzido de manchas solares. Três tempestades geomagnéticas intensas (definidas com base no índice Dst entre -100 e -250 nT) foram detectadas em Fevereiro de 2014, Março e Junho de 2015. As tempestades foram estudadas por meio dos dados dos magnetômetros da Rede EMBRACE (Estudo e Monitoramento Brasileiro do Clima Espacial) do INPE/MCTIC. O objetivo desse trabalho foi estudar as três tempestades geomagnéticas através da análise das componentes do Campo Magnético Terrestre obtido com os magnetômetros instalados em São Luís do Maranhão (MA), Eusébio (CE), Alta Floresta (MT), Cuiabá (MT), Jataí (GO), Vassouras (RJ), Cachoeira Paulista (SP), São José dos Campos (SP), e São Martinho da Serra (RS) no Brasil, e em Rio Grande (TF) na Argentina. Os principais resultados mostram que o menor valor do módulo do Campo Geomagnético nas três tempestades geomagnéticas foi de aproximadamente 22.500 nT no Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/INPE – MCTIC, em São Martinho da Serra, RS, região central da Anomalia Magnética da América do Sul (AMAS). A maior variação da componente horizontal foi de 509 nT em Cuiabá, MT, e o mínimo valor atingindo foi de 17.896 nT em Vassouras, RJ.

Trabalho apoiado pelo programa PIBIC-CNPq

ANÁLISE COMPARATIVA DOS DADOS DE MAGNETÔMETROS DO NANOSATC-BR1 COM DADOS DE MAGNETÔMETROS DE SOLO

Vítor Vaz Schultzⁱ (UFSM, Bolsista PIBIC/INPE - CNPq/MCTIC)
Dr. Clezio Marcos Denardiniⁱⁱ (DAE/CEA/INPE-MCTIC, Orientador)
Dr. Juliano Moroⁱⁱⁱ (CRS/INPE-MCTIC, Coorientador)
Dr. Nelson Jorge Schuch^{iv} (CRS/INPE-MCTIC, Coorientador)

RESUMO

A ocorrência de grandes tempestades geomagnéticas está associada, essencialmente, às Ejeções de Massa Coronal (CMEs), o que intuitivamente acreditamos ocorrer com maior frequência em períodos de máxima atividade solar. Atualmente, o Sol está em um período de baixa atividade solar, caracterizado por um número reduzido de manchas solares. Três tempestades geomagnéticas intensas (definidas com base no índice Dst entre -100 e -250 nT) foram detectadas em Fevereiro de 2014, Março e Junho de 2015. As tempestades foram estudadas por meio dos dados dos magnetômetros da Rede EMBRACE (Estudo e Monitoramento Brasileiro do Clima Espacial) do INPE/MCTIC. O objetivo desse trabalho foi estudar as três tempestades geomagnéticas através da análise das componentes do Campo Magnético Terrestre obtido com os magnetômetros instalados em São Luís do Maranhão (MA), Eusébio (CE), Alta Floresta (MT), Cuiabá (MT), Jataí (GO), Vassouras (RJ), Cachoeira Paulista (SP), São José dos Campos (SP), e São Martinho da Serra (RS) no Brasil, e em Rio Grande (TF) na Argentina. Os principais resultados mostram que o menor valor do módulo do Campo Geomagnético nas três tempestades geomagnéticas foi de aproximadamente 22.500 nT no Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/INPE – MCTIC, em São Martinho da Serra, RS, região central da Anomalia Magnética da América do Sul (AMAS). A maior variação da componente horizontal foi de 509 nT em Cuiabá, MT, e o mínimo valor atingindo foi de 17.896 nT em Vassouras, RJ. Para dar continuidade a este Projeto de Iniciação Científica, estão programadas as atividades de comparação dos resultados obtidos dos magnetômetros em solo com o magnetômetro abordo do NANOSATC-BR1 que se encontra em órbita Terrestre.

ⁱ Aluno do Curso de Física Bacharelado; Bolsista do Programa PIBIC/INPE – CNPq/MCTIC

E-mail: xultezz@gmail.com

ⁱⁱ Orientador; Pesquisador da Divisão de Aeronomia do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

E-mail: clezio.denardini@inpe.br

ⁱⁱⁱ Bolsista PCI-DA do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais

E-mail: juliano.moro@inpe.br

^{iv} Pesquisador Titular Sênior III do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais

E-mail: njschuch@gmail.com