



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

ESTUDO DO ELETROJATO E CONTRA ELETROJATO EQUATORIAL POR MEIO DE DADOS DA REDE EMBRACE DE MAGNETÔMETROS

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

Deniel Desconzi Moraes (UFSM, Bolsista PIBIC/CNPq)
E-mail: d.desconzi@gmail.com

Dr. Juliano Moro (CRS/ COCRE/INPE & NSSC/CAS, Orientador)
E-mail: julianopmoro@gmail.com

COLABORADORES

Dr. Clezio Marcos De Nardin (Embrace/INPE)
Dr. Nelson Jorge Schuch (CRS/INPE-MCTIC)

Julho de 2018

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu Orientador, Dr. Juliano Moro, pela amizade e empenho em buscar a excelência em todas as atividades que desenvolvemos. Ao Dr. Clezio Marcos De Nardin pelos conselhos e suporte. Agradeço ao meu Mentor Dr. Nelson Jorge Schuch, Pesquisador Titular Sênior III do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRS/INPE-MCTIC, pelo auxílio no crescimento pessoal e profissional. Também agradeço a todos os membros e colaboradores do Programa NANOSATC-BR, Desenvolvimento de CubeSats pela camaradagem e por me acolher no CRS/INPE. Aos servidores do CRS/INPE – MCTIC deixo meu agradecimento pelo zelo com a infraestrutura por mim utilizada e atenção despendida. Deixo um agradecimento especial ao Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica – PIBIC/INPE – CNPq/MCTIC, assim como ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq/MCTIC pelo fomento ao meu trabalho.

RESUMO

O Relatório Final de Projeto de Iniciação Científica – PIBIC/INPE-CNPq/MCTIC, apresenta as atividades realizadas pelo bolsista Deniel Desconzi Moraes, no período de Agosto de 2017 até Julho de 2018, referentes ao projeto de pesquisa “ESTUDO DO ELETROJATO E CONTRA ELETROJATO EQUATORIAL POR MEIO DE DADOS DA REDE EMBRACE DE MAGNETÔMETROS”. Durante esse projeto foi feita uma revisão teórica sobre o Sol, Sistema Solar, Ionosfera e Magnetosfera Terrestre, bem como a rede Embrace (Estudo e Monitoramento Brasileiro do Clima Espacial) de magnetômetros do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). A principal atividade desenvolvida nesse projeto refere-se ao desenvolvimento de uma técnica matemática de manipulação e tratamento de dados magnéticos coletados pelos magnetômetros da Rede Embrace para a aquisição das Curvas do Dia Quiet (QDC, do inglês *Quiet Day Curves*). A técnica é baseada na obtenção de uma curva média da variação diária da componente horizontal (H) do campo geomagnético medido nos cinco dias mais calmos de cada mês. Em seguida empregam-se algoritmos tradicionalmente usados para processar dados de radar ionosférico, adaptados para dados magnéticos a fim de determinar o nível de ruído da curva, e subtraí-lo da variação média diária. Finalmente, utiliza-se um ajuste Gaussiano para determinar os parâmetros da distribuição normal da curva, como os horários de início e fim da observação, bem como a intensidade máxima e mínima do campo geomagnético. A técnica desenvolvida foi aplicada inicialmente nos dados do magnetômetro instalado no Observatório Espacial do Sul (OES/CRS/COCRE/INPE-MCTIC, 29° S, 53° O), em São Martinho da Serra, RS, coletados entre junho de 2015 e julho de 2016 e poderá, no futuro, ser empregada nos demais magnetômetros da Rede Embrace.

Palavras-chave: Eletrojato Equatorial. Campo Geomagnético. Rede Embrace de Magnetômetros.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 2.1 – Representação esquemática da atmosfera solar.	6
Figura 2.2 – Interior solar.	7
Figura 2.3 – Imagens do Sol em diferentes comprimentos de onda.	9
Figura 2.4 – Imagem do Sol pelo <i>Extreme Ultraviolet Imaging Telescope</i>	10
Figura 2.5 – Mancha solar gigante em formação.	14
Figura 2.6 – Proeminência formada após uma Ejeção de Massa Coronal.	15
Figura 2.7 – <i>Flare</i> de classe X em diferentes comprimentos de onda.	17
Figura 2.8 – Ciclo solar completo de 11 anos.	18
Figura 2.9 – Regiões da Magnetosfera.	19
Figura 2.10 – Exemplo da reconexão magnética.	21
Figura 2.11 – Dinâmica na Magnetosfera durante tempestade magnética.	25
Figura 2.12 – Fases de uma tempestade geomagnética.	26
Figura 2.13 – Regiões e camadas da Ionosfera durante o dia e noite.	32
Figura 2.14 – Perfil vertical da densidade eletrônica.	33
Figura 4.1 – Índices Dst e Kp durante 6-9 de setembro de 2017.	39
Figura 4.2 – índices AU, AL, AO durante 6-9 de setembro de 2017.	41
Figura 4.3 – Análise de confiabilidade das QDC geradas pela rotina em IDL. .	43
Figura 4.4 – QDC para maio de 2015 em SMS após suavização.	44
Figura 4.5 – Variação mensal das QDC processadas pela técnica de remoção de ruído para SMS.	46

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 2.1 – Principais características do Sol.....	5
Tabela 2.2 – Comprimento de onda e frequência no Espectro.	11
Tabela 2.3 – Classificação de um <i>flare</i>	16
Tabela 2.4 – Classificação das tempestades magnéticas.	27
Tabela 2.5 – Estações que fornecem os dados para o cálculo do índice Kp ...	28
Tabela 2.6 – Estações que fornecem os dados para o cálculo do índice AE... 29	
Tabela 3.1 – Localização geográfica das estações da Rede Embrace de Magnetômetros.	36

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AE	Eletrojato Auroral
AIA	<i>Atmospheric Imaging Assembly</i>
ALF	Alta Floresta
CEJ	Contra Eletrojato Equatorial
CME	Ejeção de Massa Coronal
Dst	<i>Disturbance Storm Time</i>
IDL	<i>Interactive Data Language</i>
EEJ	Eletrojato Equatorial
EIT	<i>Extreme Ultraviolet Imaging Telescope</i>
ESA	<i>European Space Agency</i>
Esq	Camada Esporádica do tipo q
EUV	<i>Extreme Ultraviolet</i>
H α	H-alpha
HMI	<i>Helioseismic and Magnetic Imager</i>
IGRF	<i>International Geomagnetic Reference Field</i>
IMF	<i>Interplanetary Magnetic Field</i>
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Kp	<i>Planetarische Kennziffer</i>
Ksa	K América do Sul
SL	Lunar
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
QDC	Curva do Dia Quiet
RT	Raio Terrestre
SAMA	Anomalia Magnética da América do Sul
SDO	<i>Solar Dynamics Observatory</i>
SMS	São Martinho da Serra
SOHO	<i>Solar and Heliospheric Observatory</i>
Sq	<i>Solar Quiet</i>
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UFMS	Universidade Federal de Santa Maria
WDC	<i>World Data Center for Geomagnetism</i>

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS	1
2 REVISÃO TEÓRICA	3
2.1 Plasma	3
2.2 O Sol e o Sistema Solar	4
2.2.1 O Interior Solar, Sua Atmosfera e Observações	5
2.2.2 Principais Radiações Emitidas pelo Sol	10
2.2.3 O Campo Magnético Solar	11
2.2.4 Vento Solar	11
2.2.5 Atividade Solar	12
2.3 Magnetosfera Terrestre	18
2.3.1 Corrente De Anel	22
2.3.2 Cinturões de Radiações De Van Allen	22
2.3.3 Tempestades e Subtempestades Magnéticas	23
2.4 Índices De Atividades Magnéticas	27
2.5 Ionosfera Terrestre	30
3 INSTRUMENTAÇÃO E MÉTODOS	35
3.1 Rede Embrace de Magnetômetros	35
3.2 Dados Magnéticos	38
4 ATIVIDADES DESENVOLVIDAS	39
4.1 Análise de Índices Magnéticos	39
4.2 Desenvolvimento de Rotinas de Programação em IDL	41
5 CONCLUSÕES E ATIVIDADES FUTURAS	47
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48

1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

Neste trabalho são apresentadas as atividades desenvolvidas no período de Agosto de 2017 até Julho de 2018 referentes ao Projeto de Iniciação Científica intitulado “ESTUDO DO ELETROJATO E CONTRA ELETROJATO EQUATORIAL POR MEIO DE DADOS DA REDE EMBRACE DE MAGNETÔMETROS”. O plano de trabalho do bolsista consiste em:

- a) Realizar uma revisão bibliográfica adequada ao seu nível de formação e condizente com o projeto de pesquisa.
- b) Pesquisar em literatura adequada as metodologias correntes sobre estudos do Eletrojato e Contra Eletrojato Equatorial, suas variabilidades e fenomenologias.
- c) Participar ativamente do grupo de trabalho, frequentando reuniões técnico-científicas.
- d) Desenvolver ferramentas computacionais próprias e/ou utilizar softwares de análise e visualização de dados.
- e) Pesquisar entre os diversos instrumentos e modelos existentes, quais são aqueles compatíveis com as análises e objetivos deste projeto.
- f) Aprimorar as habilidades em uma linguagem de programação para gerar rotinas de manipulação que possibilite o estudo dos dados magnéticos através da modelagem.
- g) Adequar os dados dos instrumentos e os resultados dos modelos para realizar as análises pertinentes ao projeto.
- h) Adequar as metodologias e ferramentas para realizar um estudo comparativo entre modelos e dados magnéticos.

- i) Participar de escolas sobre os tópicos relevantes ao projeto, bem como palestras, conferências e no desenvolvimento de trabalhos científicos condizente com seu nível de aprendizado

Em vista do plano de trabalho apresentado, o bolsista dedicou-se a realizar uma revisão bibliográfica adequada nos meses de agosto, setembro e outubro de 2017, bem como o desenvolvimento de relatórios parciais que formam o Capítulo 2 e 3 deste relatório final. Em paralelo, o bolsista familiarizou-se com a linguagem de programação *Interactive Data Language (IDL)* por meio dos estudos de rotinas utilizadas pelo grupo de pesquisa no qual o aluno está inserido. Com isso, foi possível desenvolver rotinas em IDL próprias, a serem utilizadas em conjunto com àquelas já existentes para a análise dos dados da Rede Embrace de Magnetômetros. A descrição de tais rotinas encontra-se no Capítulo 4. A técnica desenvolvida para análise das chamadas Curvas do Dia Calmo (QDC) e as principais atividades desenvolvidas são apresentadas no Capítulo 4. As considerações finais são apresentadas no Capítulo 5, e, finalmente, as referências utilizadas estão no Capítulo 6.

2 REVISÃO TEÓRICA

Nesse capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica sobre os temas relacionados à Geofísica Espacial como o conceito de plasma, o Sol e o Sistema Solar, Meio Interplanetário, Magnetosfera e Ionosfera Terrestre.

2.1 Plasma

O plasma é um dos estados físicos da matéria que pode ser descrito como um gás ionizado que consiste, geralmente, de:

- Íons carregados positivamente (em casos especiais, pode conter íons carregados negativamente);
- Elétrons e;
- Partículas neutras (átomos, moléculas, radicais, etc.).

O plasma tem algumas características importantes, ele reage a campos magnéticos, conduz corrente e possui um potencial espacial bem definido (medida do potencial elétrico no espaço entre as partículas carregadas). Outra característica do plasma é a quasi-neutralidade, ou seja, a densidade de cargas positivas e negativas é muito próxima, dessa forma, o plasma se comporta como um meio eletricamente neutro.

A obtenção de plasma de forma artificial é resultado da aplicação de um campo elétrico ou magnético, de valor suficiente para alcançar o ponto de ruptura, em uma certa massa de gás, denominado "*Breakdown*". O campo mínimo necessário para a formação do plasma é função de vários fatores, como por exemplo: pressão, tipo de gás, etc.

Na natureza a formação de plasma ocorre quando um gás é aquecido a temperaturas tão altas que suas moléculas começam a se dissociar, gerando uma massa de gás ionizada e com características peculiares.

As propriedades de um plasma são dependentes das interações entre as partículas. Uma das características básicas que distinguem o comportamento de plasmas a partir de fluidos e sólidos comuns é a existência de efeitos coletivos.

Devido ao longo alcance das forças eletromagnéticas, cada partícula carregada no plasma interage simultaneamente com um considerável número de outras partículas carregadas, resultando em importantes efeitos que são responsáveis pela riqueza de fenômenos físicos que levam a ocorrerem em um plasma.

A dinâmica das partículas em um plasma é regida pelos campos internos devido à natureza e ao movimento das próprias partículas, e externamente, aos campos aplicados. As interações básicas das partículas têm caráter eletromagnético. Os efeitos quânticos são insignificantes, com exceção de alguns casos de colisões.

2.2 O Sol e o Sistema Solar

O Sol é o principal astro do sistema solar e fonte de toda a energia da Terra. Ele é uma estrela que se encontra a cerca de 150 milhões de quilômetros do nosso planeta. Sua atividade gera uma gama de efeitos que podem ser observados no âmbito terrestre.

Como dito por Hargreaves (1992), a atividade solar é a causadora da maior parte dos eventos geofísicos que se pode observar no ambiente solar-terrestre, meio interplanetário e em outros planetas do Sistema Solar.

O Sistema Solar compreende o conjunto constituído pelo Sol e todos os corpos celestes que estão sob seu domínio gravitacional. A estrela central é o maior componente do sistema e responde por mais de 99,85% da massa total (WOOLFSON, 2000). Ainda segundo Woolfson (2000), os quatro planetas mais próximos do Sol (Mercúrio, Vênus, Terra e Marte) possuem em comum uma crosta sólida e rochosa, razão pela qual se classificam no grupo dos planetas telúricos, ou rochosos. Os quatro mais afastados (Júpiter, Saturno, Urano e Netuno) são conhecidos como gigantes gasosos e são os componentes de maior massa do sistema após o Sol. Ainda há cinco planetas anões, dos quais Ceres é o que se localiza mais próximo do centro do sistema, enquanto todos os outros (Plutão, Haumea, Makemake e Éris) se encontram além da órbita de Netuno.

Além dos planetas, existe a categoria dos corpos menores que engloba asteroides (formações rochosas concentradas principalmente entre as órbitas de

Marte e Júpiter), fragmentos de gelo nos confins mais distantes do sistema, cometas (fragmentos de gelo que foram desviados para o interior do sistema e sofreram a ação do calor) e satélites naturais, como a Lua.

Nos dias de hoje, a teoria mais aceita sobre a formação do sistema solar é a chamada Teoria da Captura (DORMAND e WOOLFSON, 1971).

2.2.1 O Interior Solar, Sua Atmosfera e Observações

O Sol é uma esfera de plasma, assim como outras estrelas. Na Astronomia o Sol é uma estrela considerada comum, tem tipo espectral G2V (que é a temperatura estimada da fotosfera da estrela) com uma magnitude de 4.8. Entretanto, por estar tão próximo da Terra, o estudo desse astro ganha maior importância. A Tabela 2.1 apresenta algumas das principais características:

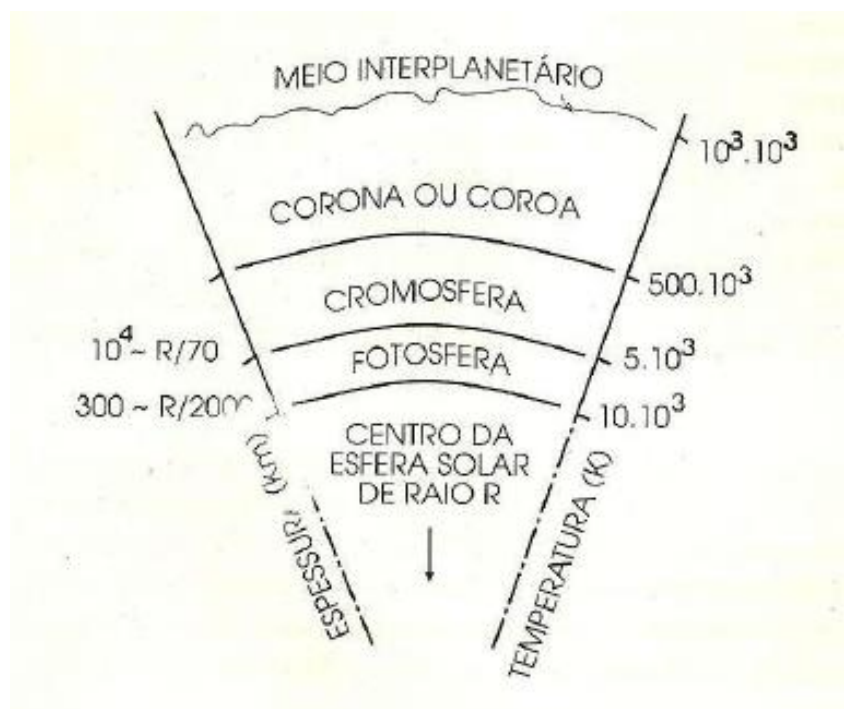
Tabela 2.2 – Principais características do Sol.

Característica	Valor	Unidade
Idade	$\approx 4,5 \times 10^{19}$	Anos
Massa	$\approx 1,99 \times 10^{30}$	kg
Raio	≈ 696.000	km
Densidade média	$1,4 \times 10^3$	kg/m ³
Atração gravitacional na superfície	≈ 274	m/s ²
Velocidade de escape na superfície	≈ 618	km/s ²
Luminosidade	$\approx 3,86 \times 10^{26}$	W
Temperatura de corpo negro	≈ 5.785	K
Composição	$\approx 90\%$ H, 10% He, $0,1\%$ outros (C, N, O)	

Fonte: Adaptado de Kivelson e Russell (1995).

A atmosfera solar é composta de três camadas sendo a mais baixa a fotosfera que se trata de uma fina camada de 500 km de espessura. Sua densidade é de 10^{23} partículas por metro cúbico e a maior parte da emissão de luz do Sol é proveniente dessa camada. Acima da fotosfera se encontra a cromosfera, uma camada irregular com uma densidade de 10^{17} partículas por metro cúbico e que se estende por cerca de 10.000 km. Por último, a coroa solar que se estende sem limite definido a partir da cromosfera, é a região de mais alta temperatura da atmosfera solar. Suas dimensões dependem fortemente da atividade solar, pois, por vezes, ela confunde-se com o meio interplanetário. Um esquema da atmosfera solar, com essas camadas, espessura e temperaturas médias é apresentado na Figura 2.1.

Figura 2.2 – Representação esquemática da atmosfera solar.



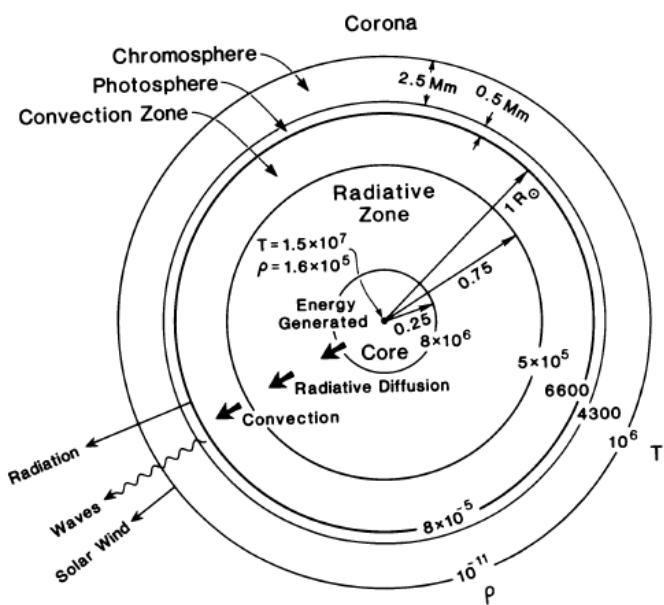
Fonte: Kirchhoff (1991).

A estrutura do interior solar é formada por três zonas conhecidas como núcleo, zona de radiação e zona de convecção. O núcleo é a única parte onde há a produção de energia por fusão, nesse caso, de hidrogênio em hélio. Esta parte

ocupa o primeiro quarto do raio do interior solar. Após o núcleo encontra-se a zona de radiação. Ela se estende por 0,4 a 0,5 raio solar de comprimento a partir do núcleo. Nessa zona, a opacidade do meio deflete a radiação o que a impede de escapar rapidamente do interior solar. Após a zona de radiação encontra-se a zona de convecção. Esta região se estende pelo último quarto do interior solar, é uma zona turbulenta onde a energia sob a forma de calor é transmitido por convecção.

O processo de convecção na zona de convecção só ocorre porque a temperatura do interior solar sofre um decremento muito rápido do centro para a fronteira. A representação esquemática do interior solar, bem como a densidade do meio, campo magnético médio e espessura, em termos do raio solar em cada uma das regiões é mostrada na Figura 2.2. O esquema também apresenta a distância aproximada entre a zona de convecção e as camadas da atmosfera solar, além de mostrar como ocorre o transporte de energia no interior solar e como ele se manifesta no meio interplanetário (radiação, vento solar e ondas no espectro eletromagnético).

Figura 2.2 – Interior solar.

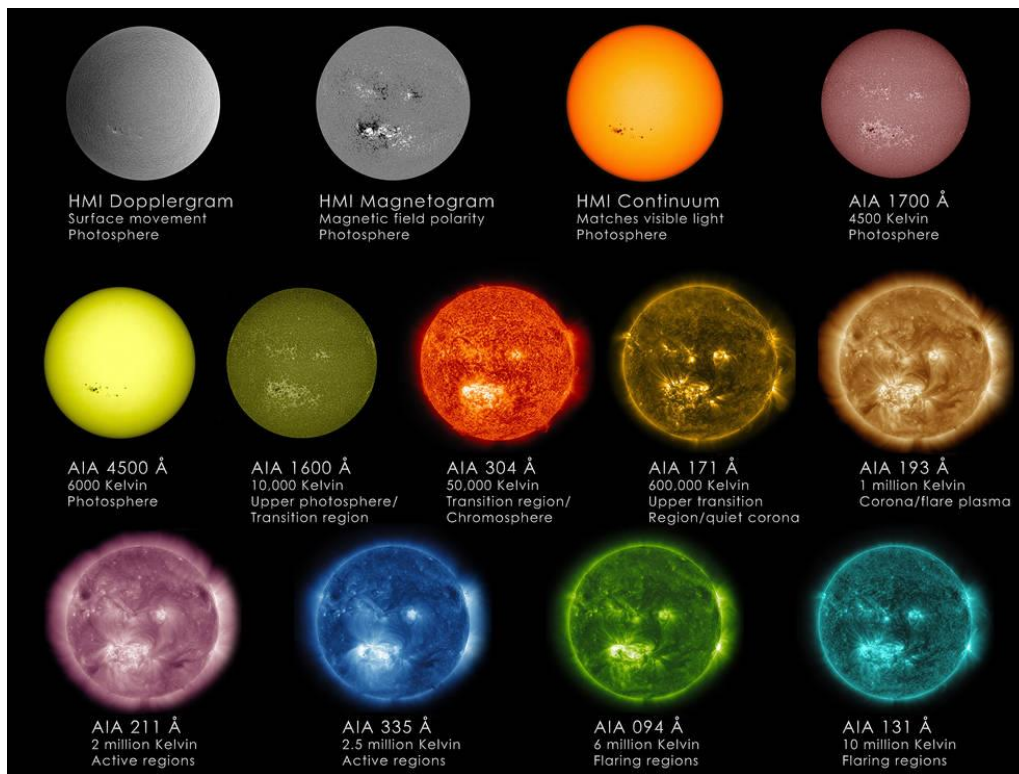


Fonte: Kivelson e Russell (1995).

A observação do Sol é uma prática que vem desde a antiguidade, entretanto, observar o Sol a olho nu é uma atividade perigosa e sem muito retorno. Dessa forma, é necessária a busca por outros métodos para observar a estrela. Dentre as maneiras de observar o Sol indiretamente podemos citar as duas mais comuns: a observação por Projeção *Pin-Hole* e a observação por projeção por reflexão. A observação por Projeção *Pin-Hole* é feita ao se observar a luz do Sol projetada em um anteparo ao passar por um pequeno orifício. A observação por reflexão consiste em refletir a luz do Sol com um pequeno espelho, para que possa ser observada em um anteparo. Uma variação desse tipo de observação é observar a reflexão do Sol na água. Não é recomendada a observação do reflexo da luz solar na água por períodos prolongados, sob o risco de prejudicar a visão do observador.

Atualmente câmeras de alta definição embarcadas em satélites fotografam o Sol e apresentam imagens do astro em diferentes comprimentos de onda. Desde 11 de fevereiro de 2010, por exemplo, o *Solar Dynamics Observatory* (SDO), lançado pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), disponibiliza imagens obtidas em diferentes comprimentos de onda do Sol, como mostra a Figura 2.3. Diferentes filtros mostram diferentes características do astro como a polaridade do campo magnético em determinada região ou a temperatura da fotosfera.

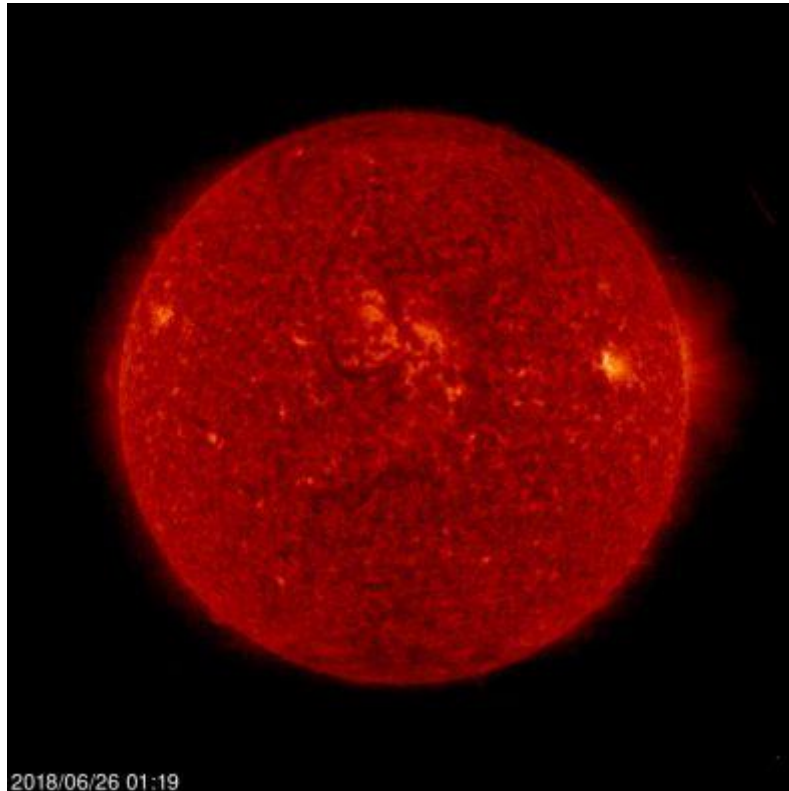
Figura 2.2 – Imagens do Sol em diferentes comprimentos de onda.



Fonte: NASA/SDO/GSFC (2013).

A *European Space Agency* (ESA) conta com o *Extreme Ultraviolet Imaging Telescope* (EIT) a bordo do *SOLar and Heliospheric Observatory* (SOHO) para adquirir imagens do Sol, como o exemplo apresentado na Figura 2.4, obtida pelo SOHO em 26 de junho de 2018. Essas imagens podem ser acompanhadas em tempo real no seguinte endereço eletrônico: <http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/The_Sun_now>.

Figura 2.2 – Imagem do Sol pelo *Extreme Ultraviolet Imaging Telescope*.



Fonte: *Extreme Ultraviolet Imaging Telescope* (EIT) (2018).

É importante também citar a luz H-alpha ($H\alpha$) que se trata uma linha espectral específica de vermelho profundo na série Balmer (série que descreve a transição de um elétron de um nível energético para outro) com um comprimento de onda de 656,28 nm. Essa luz é emitida por gases ionizados, como os presentes na atmosfera solar, e, portanto, nos permite visualizar com mais clareza o Sol.

2.2.2 Principais Radiações Emitidas pelo Sol

O Sol emite radiação eletromagnética em uma ampla faixa do espectro eletromagnético. Ele emite cerca de 4×10^{26} W de radiação eletromagnética com um fluxo de 1,4 kW/m², sendo grande parte desse fluxo na faixa do visível, ultravioleta e infravermelho. Dessa quantidade estima-se que apenas metade chegue à superfície terrestre. A radiação eletromagnética emitida se concentra em comprimentos de onda próximo ao infravermelho, ultravioleta, ondas de

rádio, raio-X e raios gama e depende da região de onde é emitida. Os valores aproximados de comprimento de onda e frequência para as regiões do Espectro Eletromagnético são mostrados na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Comprimento de onda e frequência no Espectro.

Tipo de radiação	Rádio	Micro - ondas	Infravermelho	Visível	Ultravioleta	Raios X	Raios gama
Comprimento de onda [m]	10^3	10^{-2}	10^{-5}	$0,5 \times 10^{-6}$	10^{-8}	10^{-10}	10^{-12}
Frequência [Hz]	10^4	10^8	10^{12}	10^{15}	10^{16}	10^{18}	10^{20}

Fonte: Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

2.2.3 O Campo Magnético Solar

O campo magnético solar é responsável por grande parte da atividade do plasma. Ele pode canalizar partículas, plasma, calor e isolar uma parte do plasma de sua região vizinha. O campo magnético também é capaz de acelerar o plasma ou criar alguma estrutura por meio ao exercer força sobre o mesmo. O estudo do campo magnético chama-se magnetohidrodinâmica e ele que nos permite explicar situações como o rápido decremento da pressão com a altura na fotosfera e seu baixo decremento na região da coroa. Existem uma série de instabilidades possíveis no campo magnético já conhecidas, bem como seus efeitos no plasma, não vamos trata-las aqui.

2.2.4 Vento Solar

O vento solar é um fluxo de partículas ionizadas provenientes da coroa solar que “carrega” o campo magnético solar pelo espaço interplanetário devido ao fenômeno conhecido como congelamento do plasma. Ele é resultado da enorme diferença de pressão entre a coroa solar e o espaço interplanetário.

O vento solar pode ser dividido na sua região geradora em: vento solar rápido e vento solar lento. O vento solar lento é, em geral, mais denso e instável que sua contraparte. As características do vento solar variam de acordo com a atividade solar e a posição onde é medido. Para períodos calmos, os valores médios da sua velocidade e densidade medidos na órbita terrestre são 400 km/s e 5 partículas/cm³, respectivamente (COSTA et al, 2011). Já seu campo magnético é de ≈ 5 nT. O vento solar é importante, pois é responsável por transmitir as influências da atividade solar para os corpos presentes no sistema solar.

2.2.5 Atividade Solar

A atividade solar é a medida do fluxo de raios – X vindos do Sol e potência dos *flares* (liberação repentina de energia na superfície do Sol). Está associada às variações do campo magnético e engloba as explosões solares, Ejeção de Massa Coronal (do inglês *Coronal Mass Ejection*, CME), variação na velocidade do vento solar, manchas solares, etc. Seu estudo é importante para prever o comportamento futuro do Sol e mitigar os danos causados pelas tempestades geomagnéticas decorrentes de variações na atividade solar. A atividade solar está associada ao ciclo solar. O ciclo solar é um ciclo de 11 anos no qual o Sol passa por períodos alternados de alta e baixa atividade eletromagnética que são conhecidos como mínimos e máximos solares.

As manchas solares são manchas escuras que aparecem em regiões do Sol onde há a presença de intenso campo magnético. Elas se tratam de zonas de menor temperatura na superfície solar que ocorrem devido à inibição da convecção pelo campo magnético. As manchas solares não são constantes e variam de acordo o ciclo solar. No início de cada ciclo as poucas manchas que ocorrem se encontram em regiões de alta latitude, movendo-se em direção ao equador solar ao longo dos anos. A primeira mancha solar a se formar em uma região é chamada de mancha líder. Manchas líderes costumam ser as últimas a desaparecerem e serem as maiores de suas respectivas regiões. As manchas que surgem após a mancha líder são chamadas de seguidoras. Com o início de

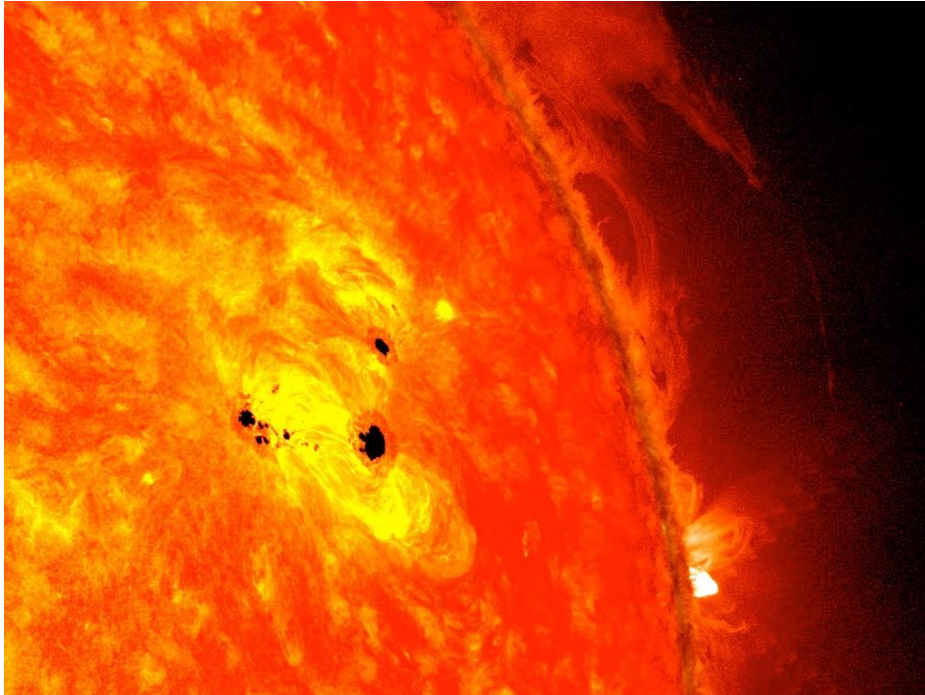
um novo ciclo solar é esperado que as manchas líderes tenham polaridade magnética inversa às manchas líderes do ciclo anterior.

As manchas solares são classificadas de acordo com sua polaridade (está associada a direção do campo magnético na mancha, se norte ou sul) e intensidade. O tamanho das manchas solares pode chegar a 20 mil quilômetros de diâmetro e elas duram até ≈ 100 dias.

A ocorrência de manchas solares afeta drasticamente o clima na Terra. Sabe-se que entre os séculos XVII e XVIII houve a ocorrência de temperaturas mais baixas que o normal na Europa. Esse período ficou conhecido como Pequena Era do Gelo, e ocorreu devido a um número muito pequeno de manchas solares naquela época.

Manchas solares seguem regras de polaridade onde normalmente os polos das manchas apresentam polaridades diferentes. Essas leis são explicadas na magnetohidrodinâmica pelo diferencial de rotação e pela força de Coriolis a qual a superfície é submetida. A Figura 2.5 mostra manchas solares gigantes em formação. Essas manchas surgiram rapidamente entre 19 e 20 de fevereiro de 2013. Seu tamanho combinado era equivalente a seis vezes o tamanho da Terra. O colapso de manchas solares desse tamanho pode enviar para o meio interplanetário uma enorme quantidade de energia. Tal energia pode causar tempestades magnéticas de altas intensidades se direcionada ao nosso planeta. Essas tempestades podem afetar as telecomunicações ao redor do globo e prejudicar equipamentos de transmissão elétrica.

Figura 2.2 – Mancha solar gigante em formação.

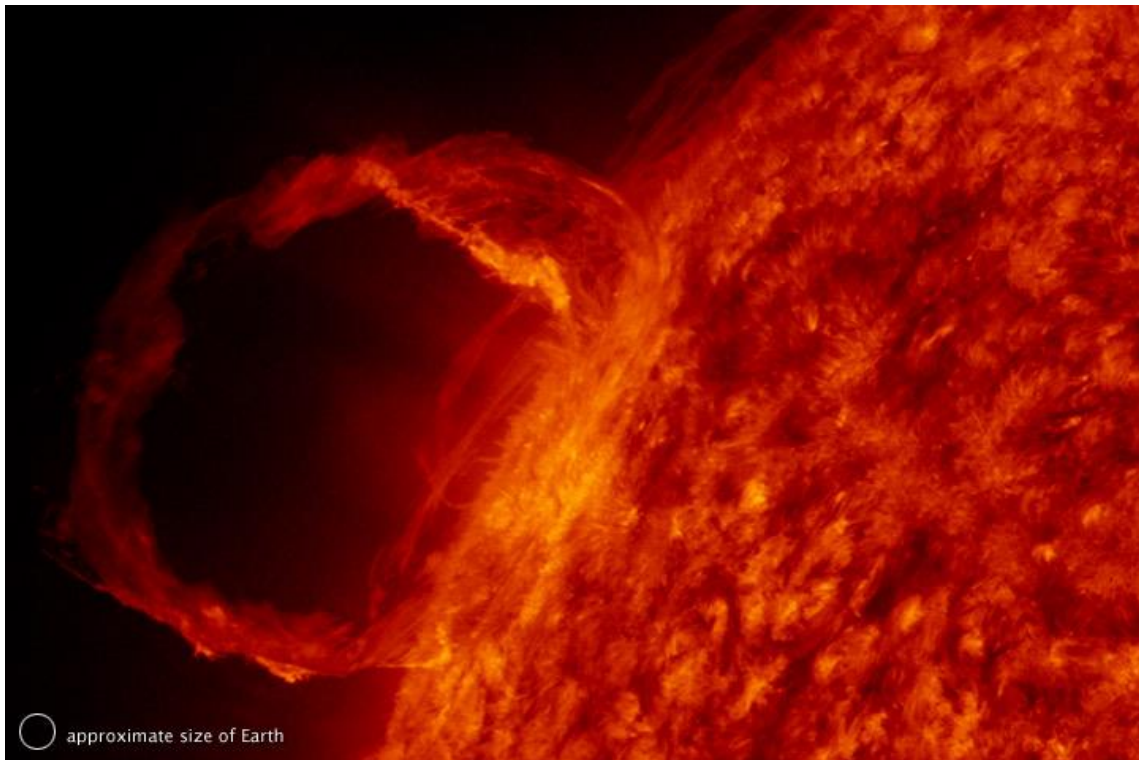


Fonte: NASA/SDO/AIA/HMI/Goddard Space Flight Center (2013).

A Ejeção de Massa Coronal trata-se de um fenômeno que ocorre na região da coroa solar quando uma grande bolha de plasma e fluxo magnético irrompe e é lançado em direção ao espaço interplanetário. Quando esse fluxo magnético é direcionado a Terra ele pode causar tempestades geomagnéticas. Quando isto ocorre se classifica o fluxo como Geofetivo.

A CME está relacionada a campos magnéticos instáveis. Pontos onde o campo magnético é aberto geram buracos coronais e pontos onde o campo magnético é fechado fazem com que o plasma seja contido. Uma oscilação do campo magnético pode ser suficiente para lançar esse fluxo de gás ionizado, constituindo a CME. Quando a CME não se afasta da coroa solar com o vento solar, ela cria uma proeminência na região onde ocorreu, como mostra a proeminência observada após uma CME em abril de 2010 na Figura 2.6.

Figura 2.26 – Proeminência formada após uma Ejeção de Massa Coronal.



Fonte: Lindsey, R. NASA Image And Animation From The Goddard Space Flight Center Scientific Visualization Studio And The Solar Dynamics Observatory.

Os *flares* ocorrem quando uma gigantesca quantidade de energia armazenada em campos magnéticos, geralmente acima das manchas solares, é repentinamente liberada. Este fenômeno produz forte emissão de radiação que se espalha por todo o espectro eletromagnético e se propaga desde a região das ondas de rádio até a região dos raios-X e raios gama. Sua ocorrência pode vir acompanhada de CME. O mecanismo de ocorrência dos *flares* divide-se em 3 fases: a fase *pré-flare* onde um desequilíbrio faz com que a superfície suba lentamente, a deflagração que ocorre quando as linhas de campo que foram esticadas começam a quebrar e reconectar, liberando energia e a fase principal, onde o fenômeno da reconexão continua e cria loops de raios-X de altas temperaturas enquanto o campo continua a se fechar. *Flares* podem durar alguns minutos ou muitas horas e são classificados como A, B, C, M ou X, de acordo com o fluxo de pico (em Watts por metro quadrado) de raios-X de 100 a 800 picômetros próximo à Terra. Ainda dentro dessa classificação, os *flares*

podem ser classificados numa escala linear que vai de 1 a 9, dessa forma, um *flare* de magnitude 3 é três vezes mais intenso que um *flare* de magnitude 1 da mesma categoria (A, B, C, M, X). Outra classificação utilizada é a baseada em observações com luz H α , citada na Seção 2.3. Essa classificação leva em consideração a intensidade do flare (fraco – *faint*, normal – *normal* ou brilhante – *brilliant*) e o tamanho da superfície emissora, em milionésimos de hemisfério. A área total do hemisfério solar é de $\approx 15,5 \times 10^{12}$ km². A Tabela 2.3 mostra ambas as formas de classificar um flare e os valores associados a cada classificação.

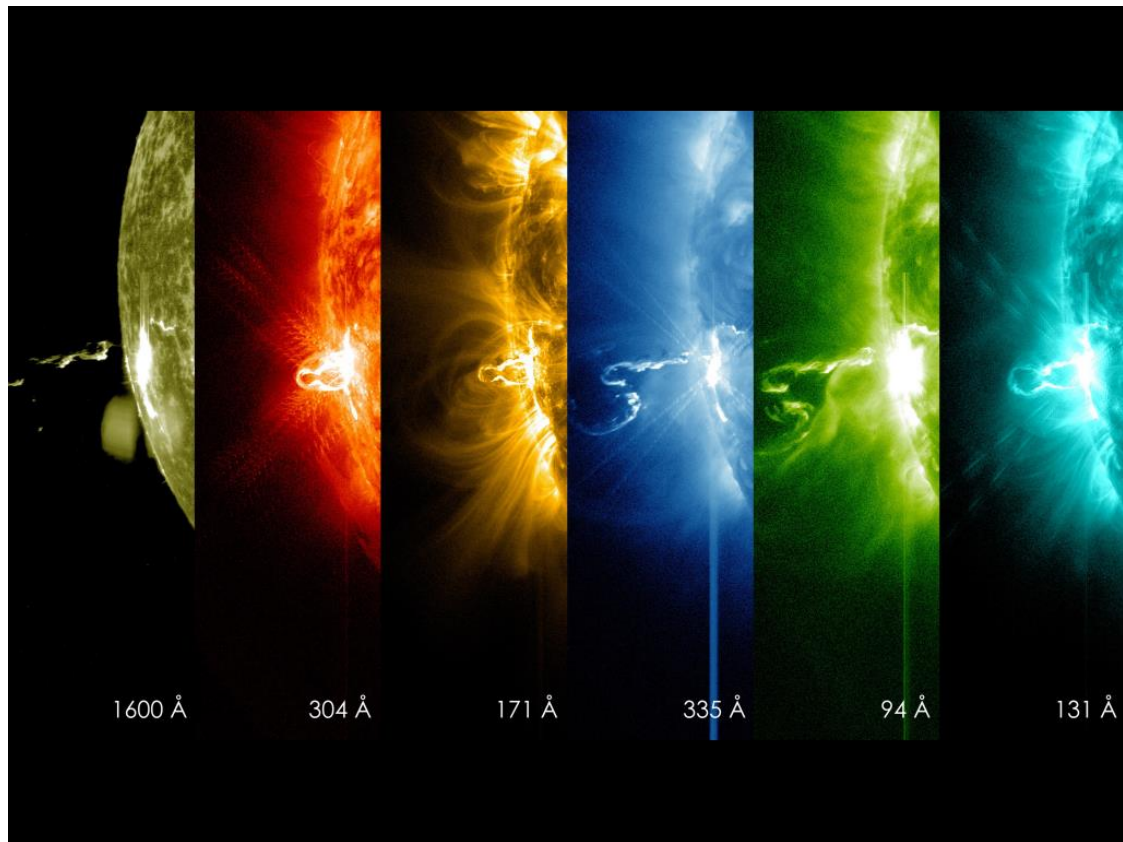
Tabela 2.2 – Classificação de um *flare*.

Classificação	Fluxo de pico de Raios-X em 100 a 800 picômetros [$\frac{W}{m^2}$]	Classificação	Área da superfície emissora [milionésimos de hemisfério]
A	$<10^{-7}$	S	<100
B	$10^{-7} - 10^{-6}$	1	100-250
C	$10^{-6} - 10^{-5}$	2	250-600
M	$10^{-5} - 10^{-4}$	3	600-1200
X	$>10^{-4}$	4	>1200

Fonte: Tandberg-Hanssen, Einar; Emslie, A. Gordon (1988).

A Figura 2.7 mostra imagens de um *flare* de classe X tiradas com diferentes filtros de luz incidente. No ponto onde o fenômeno ocorre a imagem é muito mais brilhante, o que deixa evidente a quantidade de energia liberada durante a ocorrência desse tipo de evento.

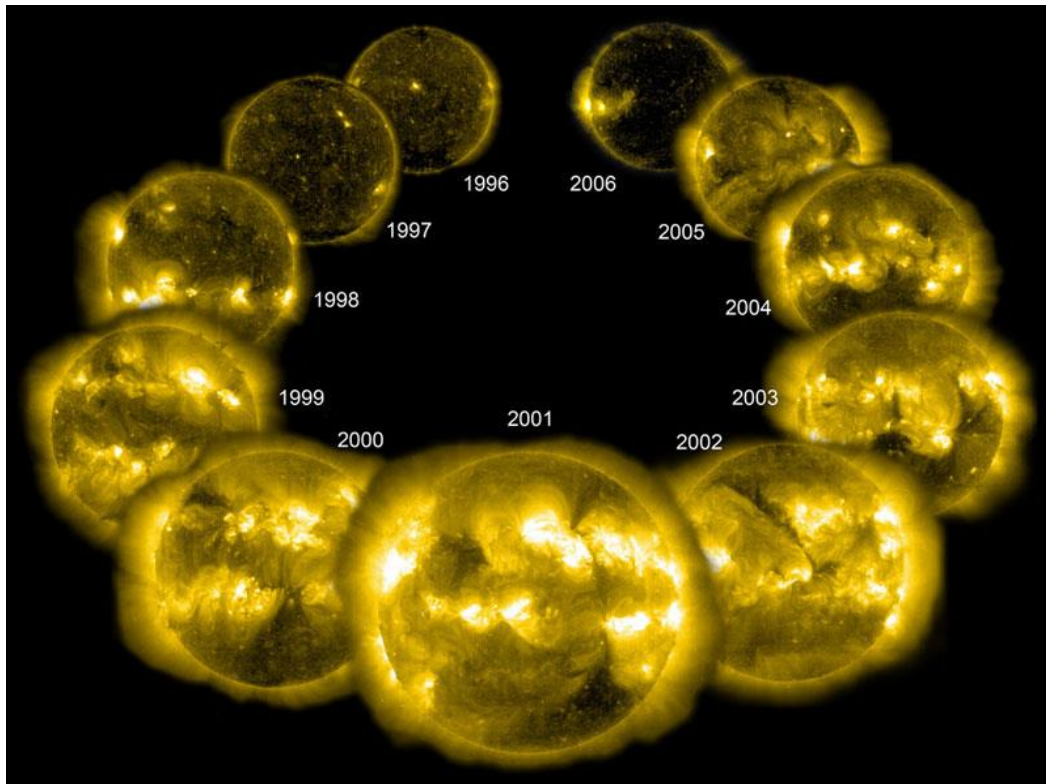
Figura 2.7 – *Flare* de classe X em diferentes comprimentos de onda.



Fonte: NASA/SDO/Goddard's Scientific Visualization Studio (2014).

A análise da atividade solar passa pela identificação dos *flares*, CME e manchas solares, comentados ao longo desta seção. O ciclo solar é o principal referencial para explicar a variação da atividade solar. A Figura 2.8 mostra um ciclo solar completo com início em 1996 e fim em 2006, é possível notar que em 1996 e 2006 a atividade solar foi mínima, devido à baixa incidência de *flares* e CME. A atividade solar aumentou entre 1996 e 2001. Em 2001 o Sol atingiu sua máxima atividade, e é possível notar várias áreas onde há ocorrência de *flares* e CME. De 2002 a 2006 a atividade solar reduziu ao ponto de, na foto correspondente ao ano de 2006, somente ser possível notar intensa atividade em um único ponto na região oeste do equador solar.

Figura 2.8 – Ciclo solar completo de 11 anos.

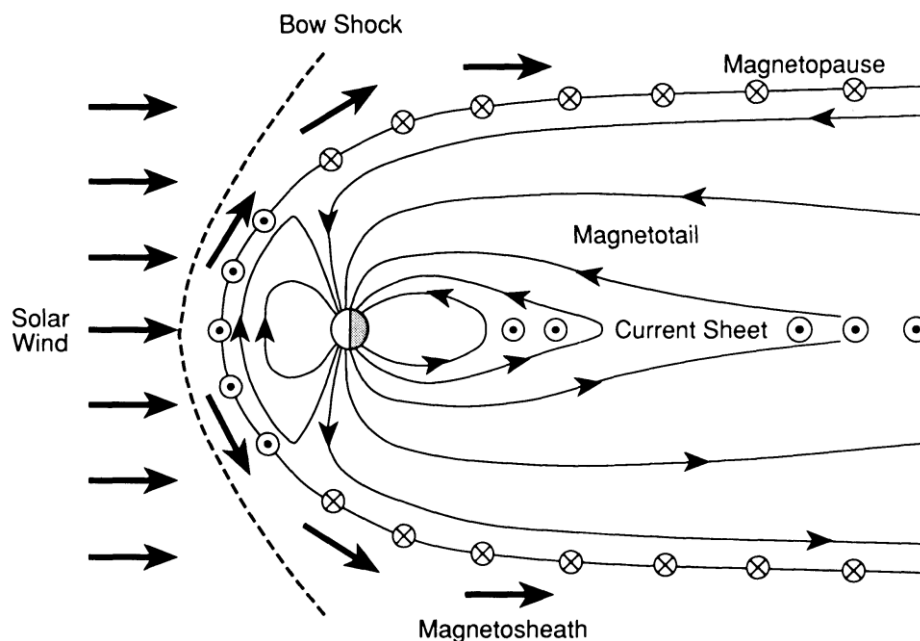


Fonte: Hill, S, SOHO, NASA/ESA (2007).

2.3 Magnetosfera Terrestre

A Magnetosfera é a região onde as forças magnéticas confinam partículas eletricamente carregadas. A Magnetosfera também funciona como um escudo que protege a superfície terrestre do vento solar. O campo geomagnético pode ser aproximado por um dipolo centrado com o eixo inclinado levemente em relação ao eixo de rotação da Terra (cerca de 11°). Os polos magnéticos movem-se lentamente e não são exatamente opostos geograficamente. O campo geomagnético é formado por correntes elétricas no núcleo de ferro do planeta. A superposição desse campo magnético com o campo magnético induzido por correntes na Ionosfera e com o campo magnético interplanetário decorrente da corrente de Dínamo Solar dá a intensidade do campo magnético na Magnetosfera. Na Figura 2.9 é possível observar um esquema representando a Magnetosfera e as regiões que serão abordadas ao longo do relatório.

Figura 2.9 – Regiões da Magnetosfera.



Fonte: Kivelson e Russell (1995).

O tamanho da Magnetosfera terrestre é determinado pelo equilíbrio entre a pressão dinâmica do vento solar e a pressão exercida pela Magnetosfera. A forma da Magnetosfera é influenciada pelo arrasto do vento solar na região. Este arrasto é predominantemente causado pelo mecanismo conhecido como reconexão em que o campo magnético do vento solar liga-se ao campo magnético da Magnetosfera. Do lado diurno a Magnetosfera se estende por aproximadamente 10 raios terrestres ($1 \text{ RT} \approx 6370 \text{ km}$), enquanto do lado noturno (Magnetocauda) se estende por cerca de 80 RT.

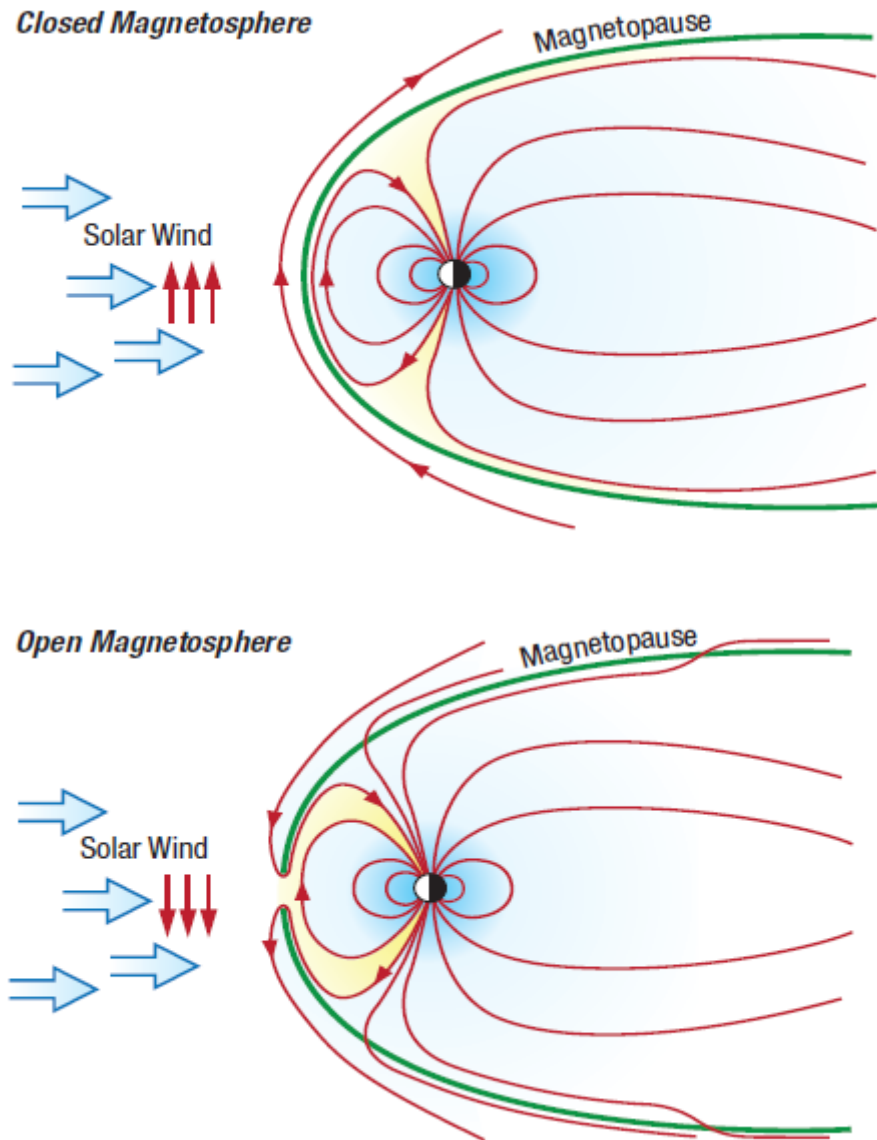
A Magnetopausa é o limite superior da Magnetosfera. Ela separa o plasma de origem terrestre do plasma decorrente do vento solar. A Magnetopausa não permite que linhas de campo a ultrapassem. Ela é comprimida pelo vento solar e sua forma pode ser deduzida a partir de um balanço de pressões nessa região, o campo magnético nos limites da Magnetosfera deve ser igual a pressão exercida pelo vento solar.

A Camada de Revestimento ou *Magnetosheat* é a região logo após a Magnetopausa formada basicamente por material solar. O vento solar, ao chegar na Magnetopausa, gera uma frente de choque. A região entre a frente de choque e a Magnetopausa é chamada de Camada de Revestimento. Nesse local o plasma é turbulento. Essa região existe, pois, a Magnetopausa pode ser tratada como um objeto sólido em uma análise física, já que ela não permite a ultrapassagem do vento solar devido ao campo magnético. Dessa forma, a *Magnetosheat* é decorrente de um choque entre o vento solar e a Magnetosfera terrestre, sendo mais quente e mais lenta que o plasma que a formou.

Os modelos da Magnetopausa preveem dois pontos onde o campo magnético total é zero. Esses pontos neutros são chamados de Vértices Polares. Nesses locais, as linhas de campo são conectadas com a superfície terrestre e a linha imaginária que representa a Magnetopausa converge para esses pontos. Nessas regiões, a matéria solar acumulada na Camada de Revestimento pode atravessar a Magnetopausa sem ter que superar nenhuma linha de campo. Esses pontos afetam fortemente a Ionosfera, pois permitem a passagem de partículas energizadas que atingem essa região.

Um processo importante que ocorre na Magnetopausa é o processo de reconexão magnética. Esse processo ocorre quando a polaridade do campo magnético interplanetário é oposta à do campo magnético terrestre em um ponto, dessa forma, eles se combinam. O processo de reconexão cria linhas de campo aberto, enraizadas em uma extremidade perto dos polos da Terra proporcionando caminhos de acesso para as partículas energizadas da Camada de Revestimento. Elas expandem temporariamente o diâmetro dos Vértices Polares, ampliando as aberturas em forma de funil nos polos magnéticos da Terra, aumentando assim a área através da qual o plasma solar pode fluir para a Magnetosfera. A Figura 2.10 mostra uma representação do fenômeno de reconexão magnética na Magnetopausa.

Figura 2.10 – Exemplo da reconexão magnética.



Fonte: Eddy (2009).

Outra região notável da Magnetosfera é a Magnetocauda. Essa região corresponde a parte mais alongada da Magnetosfera que fica na direção oposta à do Sol. Essa região é mais alongada devido ao efeito do arrasto de vento solar, que comprime a Magnetopausa onde ela aponta para o Sol e a estica na região oposta ao Sol.

A maior parte do volume da cauda é ocupada por dois grandes feixes de linhas de campo magnético quase paralelas. A parte ao norte do equador aponta para a Terra e leva a uma região aproximadamente circular, incluindo o polo magnético norte, enquanto o feixe sul afasta-se da Terra e está ligado à região polar sul. O plano que divide esses dois feixes de linha de campo é chamado de Camada Neutra, nessa região, o campo geomagnético tem intensidade muito menor que no resto da Magnetosfera.

2.3.1 Corrente De Anel

A combinação de fluxos de partículas energizadas e campos elétricos na Magnetosfera permite a existência de correntes elétricas ao longo dessa região. A corrente identificada como Corrente de Anel é especialmente importante, pois pode ser detectada por magnetômetros em solo posicionados em baixas latitudes. A Corrente de Anel circunda a Terra no sentido horário (Leste-Oeste), a sua direção ocorre de forma que ela se oponha ao campo geomagnético. Quando da ocorrência de tempestades magnéticas, a compressão da Magnetopausa causada pelo vento solar pode aumentar a intensidade do campo magnético na Magnetosfera, entretanto, a Corrente de Anel opõe o campo geomagnético de tal forma que após esse aumento de intensidade ocorre uma redução drástica no seu valor. A Corrente de Anel está posicionada entre 4 e 6 RT.

A Corrente de Anel induz correntes elétricas no solo que são de grande interesse, pois podem levar a corrosão em sistemas de superfície (p. ex. oleodutos, gasodutos) ou sobrecarregar transformadores de linhas de distribuição, reduzindo sua vida útil.

2.3.2 Cinturões de Radiações De Van Allen

Em distâncias de aproximadamente 1.000 km da superfície terrestre até 6 RT existem partículas energizadas em orbitas que circulam a Terra. Essas orbitas configuram os cinturões de radiação, estruturas alinhadas com o campo

geomagnético que aumentam de intensidade com a altitude e proximidade com o plano equatorial. Os cinturões de Radiação de Van Allen são dois cinturões de partículas conhecidos como cinturão de radiação interno e externo. O cinturão de radiação interno contém elétrons, prótons e íons mais pesados em movimento e se estende do topo da atmosfera até uma altura de cerca de 19.000 km: uma distância, medida a partir do centro do planeta, de cerca de três raios da Terra.

O cinturão externo atinge cerca de 4 a 6 RT e às vezes até 10 RT acima da superfície da Terra. Dentro dele estão as partículas atômicas carregadas mais leves e menos energéticas, que são elétrons mais fracos com energias na faixa de 10.000 a cerca de um milhão de elétrons-volts. Eles decorrem, em grande parte, de plasmas de baixa energia que entraram na Magnetosfera com o vento solar e da Ionosfera terrestre.

Não existe entre os dois cinturões uma delimitação bem definida, eles fundem-se em altitudes variáveis. Durante os períodos de intensa atividade solar, grande parte das partículas eletricamente carregadas vindas do Sol consegue romper a barreira formada pelos cinturões de radiação de Van Allen.

Nota-se que o cinturão externo ocupa a mesma faixa da Corrente de Anel, a grande diferença conceitual entre os dois fenômenos é que o primeiro está relacionado a partículas com alto poder de penetração em materiais densos e que podem danificar componentes e veículos enviados ao espaço. Já o segundo está relacionado a partículas que contribuem para a densidade de cargas na região, que geram a corrente elétrica.

2.3.3 Tempestades e Subtempestades Magnéticas

Eddy (2009) classifica as tempestades magnéticas como a principal causa de distúrbios no campo geomagnético. Essas tempestades são decorrentes do campo magnético estendido do Sol, também chamado de campo magnético interplanetário ou IMF (do inglês, *Interplanetary Magnetic Field*) (EDDY, 2009). A reconexão magnética também está envolvida, pois ela permite a transferência de energia de um fluxo de vento solar rápido ou acelerado por CME para a Magnetosfera e a Ionosfera. A atração excessiva do vento solar também

configura padrões de circulação em grande escala no plasma magnetosférico e ionosférico, que por sua vez fornecem energia para subtempestades geomagnéticas.

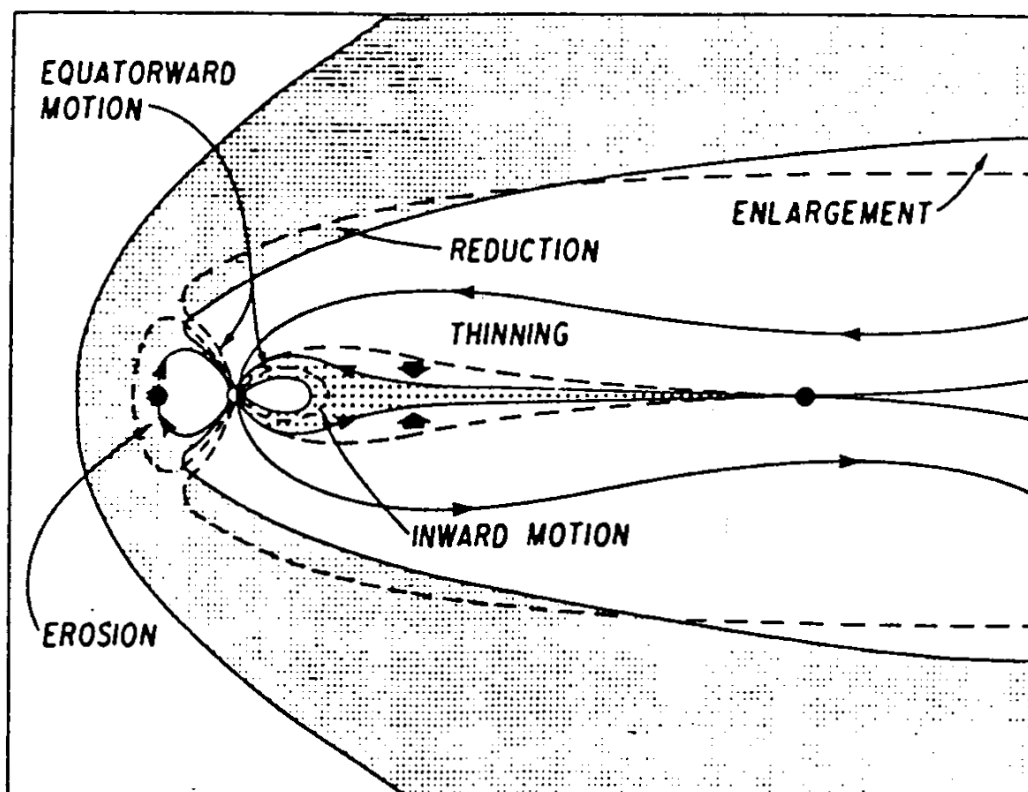
Eddy (2009) também elenca os principais impactos na Terra das tempestades magnéticas como sendo correntes elétricas induzidas que correm desde a Magnetosfera até a superfície da Terra, e até mesmo abaixo do solo e no fundo do oceano. Para que uma tempestade magnética ocorra, é necessário que campos magnéticos solares com uma componente significativa apontando para o Sul sejam lançados em direção a Terra. Isso pode ocorrer após uma massa de plasma ser acelerada por um CME ou por fluxos de alta velocidade no vento solar. Ambos são muitas vezes precedidos por uma onda de choque em desenvolvimento que coloca a tempestade em movimento. As perturbações podem ser sentidas nas medidas de magnetômetros principalmente na componente horizontal do campo geomagnético local (H).

Segundo Hargreaves (1992) as tempestades magnéticas diferem das subtempestades magnéticas basicamente em intensidade e duração. Uma subtempestade magnética pode vir a se tornar uma tempestade magnética se a componente do IMF se manter apontada para o Sul por muito tempo. Subtempestades magnéticas são o tipo mais frequente de atividade geomagnética, sendo constituídas pelos distúrbios que ocorrem na Magnetosfera e na Ionosfera quando o campo magnético interplanetário é dirigido para o Sul. Isso aumenta o fluxo de energia que é transportado do vento solar para o interior da Magnetosfera.

Tempestades magnéticas ocorrem em três fases que estão relacionadas ao índice Dst (*Disturbance Storm Time*): a fase de alerta ou fase inicial, fase principal e fase de recuperação. Na fase de alerta que também é conhecida como fase inicial as linhas de força do campo da Terra no lado virado para o Sol são espremidas para dentro em direção à superfície do planeta, produzindo o salto súbito observado na força do campo. Durante várias horas após essa iniciação abrupta, o campo magnético da Terra permanece mais forte do que o

normal. A Figura 2.11 mostra as mudanças na Magnetosfera durante essa fase da tempestade magnética.

Figura 2.11 – Dinâmica na Magnetosfera durante tempestade magnética.

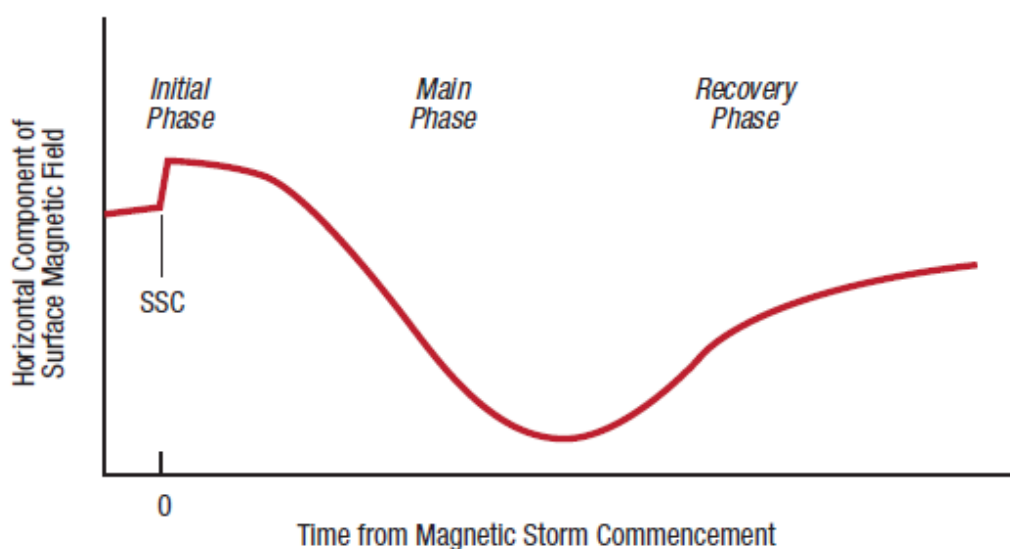


Fonte: Hargreaves (1992).

Durante a segunda e chamada fase principal da tempestade, a componente sul do campo magnético na nuvem de partículas solares faz contato com o campo magnético apontado para o norte, orientado para a frente da Terra. Nessa fase ocorre o fenômeno da reconexão magnética. Essa fase pode durar de horas a dias. Nesse momento a tempestade magnética distende e perturba a Magnetocauda, fortalecendo campos elétricos na Magnetosfera e Ionosfera e acelerando partículas. Partículas transportadoras de corrente podem ser desviadas para as regiões polares do Norte e do Sul, onde colidem com átomos atmosféricos e moléculas para produzir exibições da aurora. Os movimentos sistemáticos de íons carregados positivamente também intensificam a Corrente

de Anel. Na fase final ou fase de recuperação, que geralmente leva vários dias, a intensidade do campo geomagnético gradualmente retorna ao normal. A Figura 2.12 mostra um gráfico da componente horizontal local do campo geomagnético em função da duração de uma tempestade geomagnética.

Figura 2.12 – Fases de uma tempestade geomagnética.



Fonte: Adaptado de Eddy (2009).

As subtempestades magnéticas também são caracterizadas por três fases distintas, chamadas fase de crescimento, fase de expansão e fase de recuperação. Durante a fase de crescimento ocorre uma energização da Magnetosfera decorrente da reconexão magnética. A fase de expansão corresponde à liberação ou recarregamento da energia armazenada, enquanto a fase de recuperação é o retorno da magnetosfera às suas condições normais.

Subtempestades típicas têm duração média entre 1 e 3 horas e amplitudes de perturbação da ordem de 200 a 2.000 nT, sendo caracterizadas pelo índice de atividade auroral AE (*Auroral Electrojet*). As tempestades magnéticas, por sua vez, são caracterizadas pelo índice Dst. A classificação das tempestades magnéticas de acordo com esse índice é apresentada na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 – Classificação das tempestades magnéticas.

Intensidade da tempestade	Dst (nT)
Muito intensa	<-250
Intensa	-100 a -250
Moderada	-50 a -100
Fraca	-30 a -50

Fonte: Adaptado de Gonzales et al (1994)

2.4 Índices De Atividades Magnéticas

A atividade magnética na superfície terrestre é produzida por correntes elétricas na Magnetosfera e na Ionosfera. Índices de atividades geomagnéticas são importantes, pois tratam-se de uma maneira barata e confiável (não afetada por condições climáticas) de se monitorar essas correntes. Além disso, é interessante que tenhamos a capacidade de estimar o nível de dissipação de energia na Magnetosfera em um momento específico. Os índices de atividades magnéticas também dão uma ideia semiquantitativa da atividade geomagnética que é decorrente de variações no vento solar que afetam a estrutura dinâmica da Magnetosfera, refletindo-se em perturbações no campo geomagnético, as perturbações geomagnéticas. Os índices mais comuns são: Kp, ap, AE e Dst.

O índice Kp (*Planetarische Kennziffer*) é encontrado a partir de uma composição estatística de dados de estações na zona de aurora (regiões onde é possível observar auroras). O índice representa a intensidade do fluxo solar e as perturbações causadas na alta atmosfera, principalmente na Ionosfera terrestre. O índice Kp também varia conforme a hora do dia, época do ano, e também com a posição da Terra em relação ao Sol, pois há uma relação direta: quanto mais alto está o índice, mais intensos estão os eventos solares, e mais radiação ionizante atinge a Terra. As condições da Ionosfera estão relativamente calmas quando o índice está abaixo de 3, valores entre 3 e 5 indicam Ionosfera inquieta ou com pouca atividade, valores acima ou igual a 5 indicam atividade geomagnética que sinaliza tempestade solar, e acima de 6 são preocupantes, e há possibilidade de danos e interferências em equipamentos tecnológicos,

devido à fortes tempestades geomagnéticas, então diversas empresas e instituições precisam ser alertadas. Mas valores altos de Kp, podem indicar apenas rearranjos repentinos do campo magnético devido ao vento solar. A Tabela 2.5 mostra as estações utilizadas para adquirir o índice Kp.

Tabela 2.5 – Estações que fornecem os dados para o cálculo do índice Kp

Observatório	Latitude geomagnética Norte (°)	Latitude geomagnética Leste (°)
<i>Sitka</i>	60,0	275,3
<i>Meanook</i>	61,8	301,0
<i>Agincourt</i>	55,1	347,0
<i>Ottawa</i>	57,0	351,5
<i>Fredericksburg</i>	49,6	349,8
<i>Hartland</i>	54,6	79,0
<i>Eskdalemuir</i>	58,5	82,9
<i>Lerwick</i>	62,5	88,6
<i>Witeveen</i>	54,1	91,2
<i>Wingst</i>	54,6	94,1
<i>Rude Skov</i>	55,9	98,5
<i>Lovö</i>	58,1	105,8
<i>Amberly</i>	-47,7	252,5
<i>Toolangi</i>	-46,7	220,8

Fonte: Adaptado de Rostoker (1972).

O índice ap é um índice baseado numa escala linear. A média de 8 valores de ap para um intervalo de 3 horas é chamada equivalente diária de amplitude planetária ou Ap. O índice ap é obtido diretamente do índice Kp e é baseado apenas em observações a médias latitudes. Os valores numéricos de ap estão relacionados à magnitude dos distúrbios numa estação a médias latitudes.

O índice Kp dá uma ideia geral do estado da atividade geomagnética ao redor do planeta levando em consideração as contribuições da Corrente de Anel e do

Eletrojato Auroral. Para estudar a atividade nas zonas aurorais, é importante focar nesta última contribuição. Para que isso fosse possível, foi proposto o índice AE (*Auroral Electroject*) que é obtido a partir de dados de estações levemente sub-aurorais escolhidas para cobrir uniformemente a área ao redor da zona auroral. A Tabela 2.6 apresenta essas estações.

Tabela 2.6 – Estações que fornecem os dados para o cálculo do índice AE.

Observatório	Latitude geomagnética Norte (°)	Latitude geomagnética Leste (°)
Halley Bay	-65,8	24,3
Norway Station	-63,8	43,9
Lerwick	62,5	88,6
Dombås	62,3	100,1
Sodankylä	63,8	120,0
Dixon Island	63,0	161,6
Tixie Bay	60,4	191,4
Cape Wellen	61,8	237,1
College	64,6	256,5
Sitka	60,0	275,3
Meanook	61,8	301,0
Byrd	-70,6	336,0

Fonte: Adaptado de Rostoker (1972).

O índice Dst indica a intensidade da Corrente de Anel sem considerar outras influências. Atualmente seu valor é calculado a partir de dados de apenas 3 estações, porém os pesquisadores estão a todo tempo testando a utilização de dados de outras estações para refinar o índice.

Os índices Kp e ap são obtidos levando em conta dados de magnetômetros de três coordenadas (tanto geográficas quanto magnéticas), já os índices AE e Dst

consideram apenas a componente magnética H . Portanto, essa componente tem grande importância.

2.5 Ionosfera Terrestre

A Ionosfera terrestre consiste de uma série de regiões ionizadas acima da superfície terrestre (cerca de 60 km até 300 km) onde um número significativo de elétrons livres com energia térmica (<1 elétron Volt) e íons positivos estão presentes. Em baixas latitudes encontram-se também alguns íons positivos. O meio como um todo é eletricamente neutro e embora as partículas carregadas correspondam a uma pequena parte em relação às partículas neutras elas exercem uma grande influência nas propriedades elétricas do mesmo. Os elétrons livres e os íons são produzidos através da ionização das partículas neutras tanto pela radiação ultravioleta extrema vinda Sol quanto por colisões com partículas energéticas que penetram a atmosfera, as colisões são principalmente importantes em altas latitudes. Uma vez formada, as partículas carregadas são afetadas por uma série de processos, incluindo, mas não limitados a: reações químicas, difusão, distúrbios das ondas, instabilidades plasmáticas e transporte devido a campos elétricos e magnéticos (RISHBETH e GARIOTT, 1969; SCHUNK e NAGY, 2000). A cada 11 anos, obedecendo ao ciclo das manchas solares, a densidade de elétrons e a composição da ionosfera sofrem mudanças, podendo bloquear totalmente as comunicações em alta frequência por alguns minutos.

A propagação de ondas eletromagnéticas no plasma ionosférico se comporta analogamente como ondas sonoras dentro de fluídos de diferentes densidades. São observados fenômenos de reflexão, refração, a depender da condição de momento.

Os processos dentro da Ionosfera podem ser divididos em duas grandes categorias: processos de produção e de destruição de plasma, que resultam em uma dinâmica de ionização. O principal processo de produção de pares íons-elétrons livres é a absorção de radiação ultravioleta solar extrema (EUV, do inglês *Extreme Ultraviolet*) e raios-X. Para altas latitudes há também a ocorrência

de formação de pares devido a colisão de partículas energéticas carregadas e moléculas neutras, principalmente durante tempestades geomagnéticas. Além disso, na camada D ocorre um processo de produção associado à radiação Lyman- α . Os processos de destruição de plasma podem se dividir em recombinação de íons e elétrons, recombinação de íons moleculares e elétrons e ligação de elétrons a moléculas neutras, sendo este último para baixas latitudes. Embora não sejam processos levados em conta com muita frequência, os processos de difusão e deriva podem causar a perda de elétrons. Ainda, processos de transporte de massa são bastante comuns e se devem principalmente a gradientes de pressão e temperatura. A deriva do plasma é um fenômeno interessante, assumindo um íon positivo e um elétron, se movidos em direções opostas, tem suas correntes adicionadas. Entretanto, para o caso em que o íon e o elétron se movem na mesma direção, temos um plasma em movimento, porém sem gerar uma corrente elétrica.

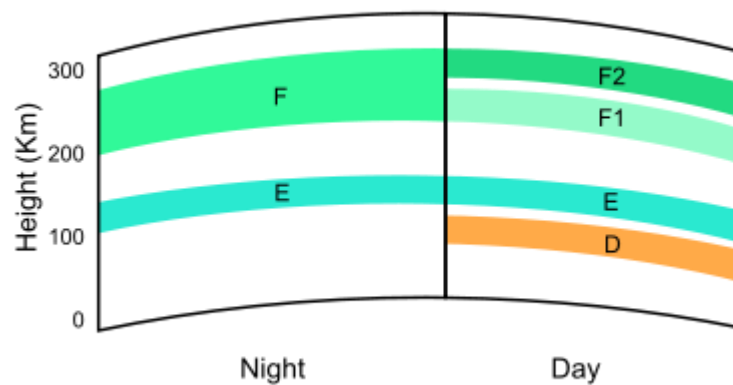
As regiões principais da Ionosfera são:

- Região D – situada de 60 a 90 km de altura, com densidade de 10^8 a 10^{10} elétrons/m³. Durante a noite essa camada não é detectada por sondadores ionosféricos. As colisões entre elétrons, íons e partículas neutras são relativamente frequentes durante o dia, causando atenuações nos sinais de rádio que interagem com a Ionosfera. Do ponto de vista químico, é a região em que ocorre os processos mais complexos.
- Região E – situada de 90 a 160 km de altura, com densidade 10^{11} a 10^{12} elétrons/m³. Torna-se muito mais fraca durante a noite. As chamadas camadas E esporádicas (Esq) ocorrem nessa região devido aos íons metálicos originados pela ablação de meteoros;
- Camada F1 – situada de 160 a 200 km de altura, tem densidade eletrônica de aproximadamente 10^{11} elétrons/m³. Essa camada também desaparece durante a noite.
- Camada F2 – situada acima de 200 km de altura, tem densidade de elétrons de até 10^{12} /m³. Reduz sua intensidade durante a noite, porém não da mesma forma que a outra camada (F1) e a Região E. A formação

da F2 é predominantemente dependente da difusão, mas sua concentração de elétrons também varia com a atividade solar.

A Figura 2.13 ilustra as camadas da Ionosfera.

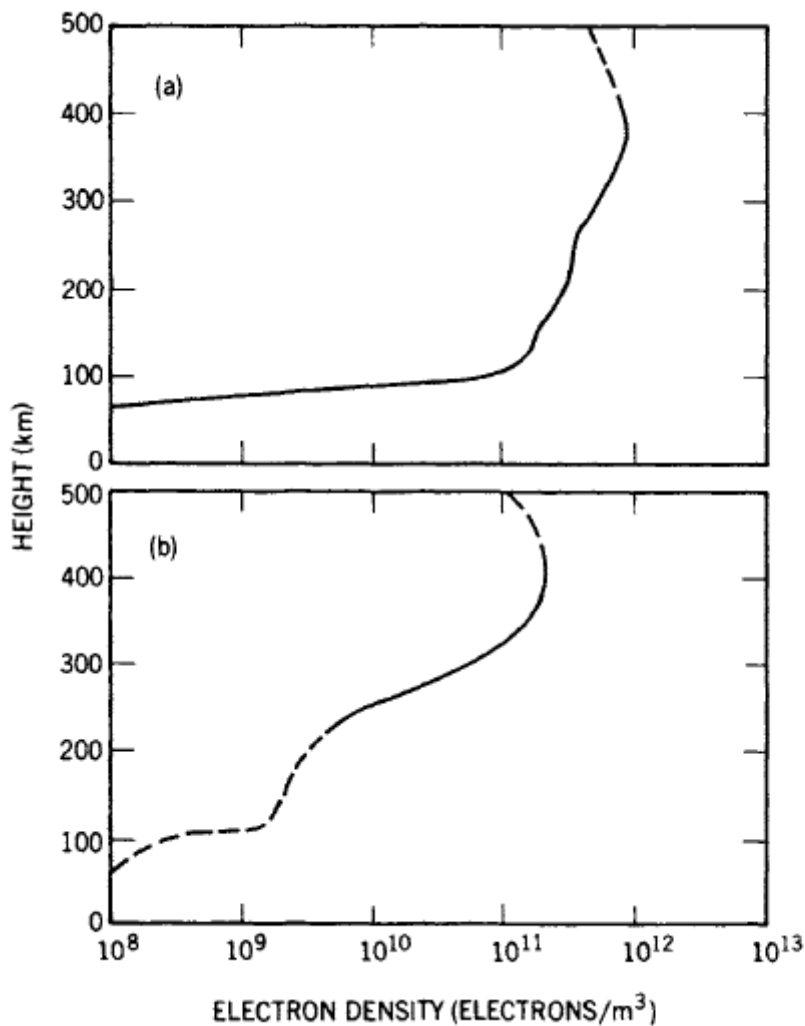
Figura 2.13 – Regiões e camadas da Ionosfera durante o dia e noite.



Fonte: DX Clube do Brasil.

A diminuição da intensidade das camadas durante a noite se deve a não existência da energização pela radiação solar nesse momento. Entretanto, as Esq tem a particularidade de ficar mais ativas quanto mais perpendiculares são os raios solares que incidem sobre elas. A Figura 2.14 apresenta a densidade de elétrons pela altura para dia e noite na Ionosfera.

Figura 2.14 – Perfil vertical da densidade eletrônica.



Fonte: Davies (1990).

O campo geomagnético exibe uma variação durante tempos calmos e perturbados. Durante os tempos calmos, as variações magnéticas são causadas principalmente pelos sistemas *Solar-quiet* (Sq) e Lunar (SL). Esses sistemas circulam na região E, onde são gerados campos elétricos do dínamo à medida que o movimento da atmosfera neutra arrasta os íons através das linhas do campo geomagnético. A corrente Sq é conduzida pela radiação solar EUV, que não só produz a ionização na região E, mas também aquece a atmosfera e provoca ventos. O componente primário de vento que impulsiona a corrente Sq é a maré diurna, que tem uma pequena progressão de fase com altitude. Como

o Sol é responsável pelo sistema Sq, esse sistema e o distúrbio magnético associado a ele se movem para o oeste à medida que a Terra gira. A corrente Sq normalmente se estende de cerca de 90 a 200 km e tem seu máximo em cerca de 150 km. Os ventos térmicos na região E equatorial geram campos elétricos de dínamo à medida que os íons são arrastados. Esses campos de dínamo são responsáveis pelo Eletrojato Equatorial (EEJ, do inglês *Equatorial Electrojet*).

O EEJ geralmente ocorre no sentido oeste-leste durante o dia. No entanto, ocasionalmente existem dias em que os dados geomagnéticos indicam um fluxo de corrente para o oeste, que normalmente dura algumas horas. O fluxo reverso do EEJ é chamado de Contra Eletrojato (CEJ, do inglês *Counter Electrojet*). Estudos sugerem que a ocorrência do CEJ está associada à alguns fatores, como fase da lua (BARTELS e JOHNSTON, 1940), aquecimento repentino estratosférico durante o inverno (STENING et al. 1996), variações incomuns no sistema Sq em latitudes acima ou abaixo do equador magnético durante períodos geomagneticamente calmos (BHARGAVA e SASTRI, 1977), penetração do campo elétrico da região polar em latitudes equatoriais (RASTOGI e PATEL, 1975), entre outros.

As condições necessárias e suficientes para detectar o CEJ são a reversão dos perfis de H e Z (MAYAUD, 1977). Entretanto, o uso de apenas uma estação equatorial não nos permite ter certeza da ocorrência do CEJ. Portanto, a confiabilidade dessa detecção está atrelada ao número de estações disponíveis para análise.

3 INSTRUMENTAÇÃO E MÉTODOS

Nesse capítulo são apresentadas as metodologias de análise de dados dos principais equipamentos utilizados, principalmente os magnetômetros, e também uma introdução sobre a Embrace MagNet.

3.1 Rede Embrace de Magnetômetros

A rede Embrace de Magnetômetros (Embrace MagNet) foi concebida para cobrir a maior parte da porção leste do setor longitudinal da América do Sul (DENARDINI et al., 2016b), instalando e operando estações de magnetômetros do tipo “fluxgate”.

Esta rede preenche a lacuna de medidas magnéticas disponíveis on-line na América do Sul e pretende fornecer dados magnéticos para serem utilizados como uma estimativa do nível de perturbação regional causado pelas tempestades geomagnéticas conduzidas pelos efeitos do Clima Espacial, e desenvolver o índice K da América do Sul (Ksa). Além disso, uma meta científica de longo prazo é investigar as tendências na intensidade magnética da Anomalia Magnética da América do Sul (SAMA, do inglês *South America Magnetic Anomaly*) e a implicação de sua presença no desvio dos índices magnéticos usados para monitorar a relação Solar-Terrestre associada ao clima espacial (DENARDINI et al., 2018a).

Nesses magnetômetros, um núcleo de material magnético de alta permeabilidade, de fácil saturação, é utilizado para obter o sinal do campo magnético existente no ambiente. Os magnetômetros são constituídos por duas bobinas. A primeira, chamada de primária, provoca uma variação da permeabilidade do núcleo, saturando-o periodicamente. A segunda, chamada de secundária, faz a detecção do campo magnético externo que se quer medir. Os magnetômetros operados na rede foram construídos para, de forma compacta e com alta performance, fornecer medidas de alta precisão do vetor do campo geomagnético, obtendo medidas de até $\pm 70\ 000$ nT e variações dinâmicas de

± 250 nT, $\pm 1\ 000$ nT e $\pm 2\ 500$ nT cobrindo as variações diurnas de amplitude das componentes magnéticas de baixas a altas latitudes (DENARDINI et al., 2015).

A disponibilidade de Internet rápida, fornecimento confiável de energia e fácil acesso foram os pontos-chave para decidir a localização exata das estações de magnetômetros do Embrace MagNet. A Tabela 3.1 apresenta a localização das estações Embrace MagNet, que começaram a ser instaladas em maio de 2011 e estão originalmente planejadas para serem concluídas em dezembro de 2021 (DENARDINI et al., 2018a).

Tabela 3.1 – Localização geográfica das estações da Rede Embrace de Magnetômetros.

Localização (Cidade, Estado)	Código	Latitude Longitude
Boa Vista, RR	BOA	02°48002"N 60°40033"W
Manaus, AM	MAN	02°53018"S 59°58011"W
Porto Velho, RO	PVE	08°45049"S 63°54023"W
Belém, PA	BLM	01°26028"S 48°26040"W
São Luís, MA	SLZ	02°35039"S 44°12035"W
Alta Floresta, MT	ALF	09°52013"S 56°06015"W
Araguatins, TO	ARA	05°36001"S 48°06002"W
Eusébio, CE	EUS	03°52048"S 38°25028"W
Palmas, TO	PAL	10°17050"S 48°21041"W
Cuiabá, MT	CBA	15°33017"S 56°04010"W
São João do Cariri, PB	CRR	07°23021"S 36°32021"W
Jataí, GO	JAT	17°55055"S 51°43005"W

(continua)

Tabela 3.1 – Continuação.

Localização (Cidade, Estado)	Código	Latitude Longitude
Campo Grande, MS	CGR	20°30024"S 54°37004"W
Tucumán, TU	TCM	26°49020"S 65°11040"W
Medianeira, PR	MED	25°17043"S 54°05038"W
Cachoeira Paulista, SP	CXP	22°42007"S 45°00052"W
São José dos Campos, SP	SJC	23°12031"S 45°57049"W
Vassouras, RJ	VSS	22°24007"S 43°39008"W
São Martinho da Serra, RS	SMS	29°26037"S 53°49022"W
Chillán, CO	CHI	36°38015"S 71°59057"W
Aiguá, MA	AIG	34°12016"S 54°45038"W
Bahia Blanca, BA	BBA	38°41000"S 62°15037"W
Rio Grande, TF	RGA	53°47009"S 67°45042"W
Estação Cmte. Ferraz, AC	ECF	62°05006"S 58°24012"W

Fonte: Adaptado de Denardini et al (2018a).

Dentre as estações citadas acima deve-se destacar as estações de São Martinho da Serra (SMS) e Alta Floresta (ALF), devido à sua importância para o presente projeto, já que todas as análises feitas foram para SMS, e as futuras análises sobre EEJ e CEJ serão feitas, provavelmente, com os dados coletados em ALF.

3.2 Dados Magnéticos

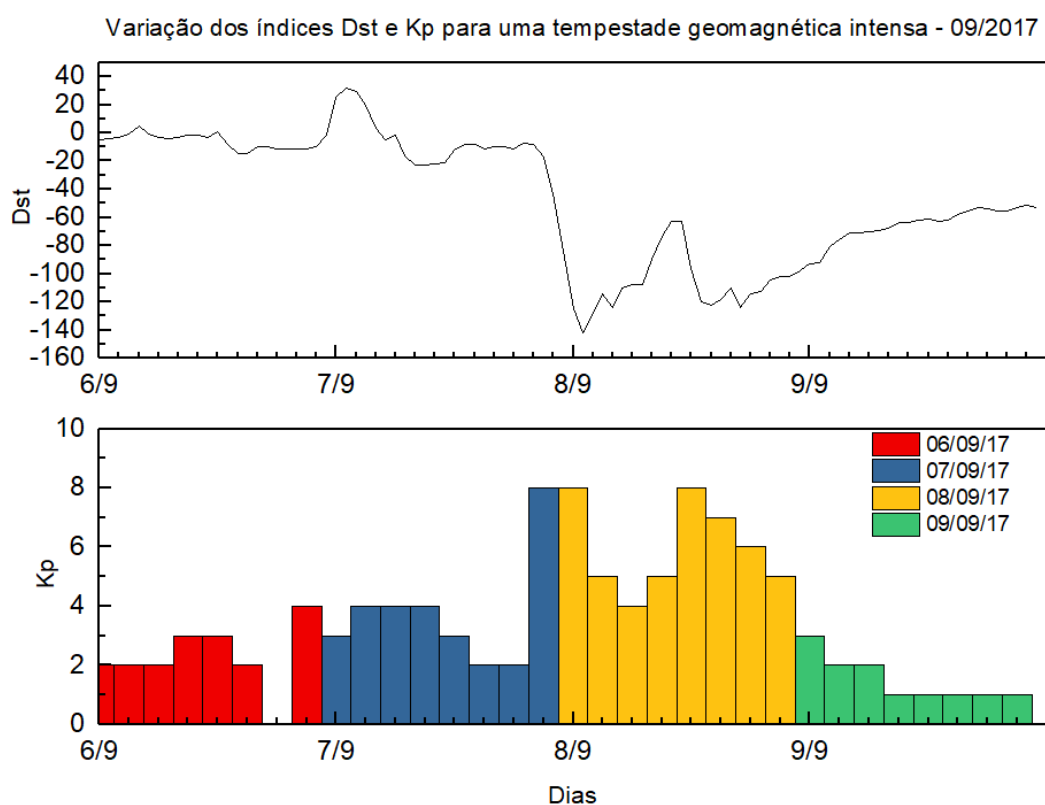
Apesar da disponibilidade online dos dados da rede Embrace, os dados utilizados nesse projeto passaram por um pré-processamento. As classificações dos dias em geomagneticamente calmos e perturbados foram realizadas por meio do relatório do Centro Mundial de Dados para Geomagnetismo (WDC, do inglês *World Data Center for Geomagnetism*) disponível on-line, feito pela Universidade de Kyoto. As rotinas de programação utilizadas foram todas feitas em IDL, e a construção dos gráficos foi realizada por meio do *software OriginPro*.

4 ATIVIDADES DESENVOLVIDAS

4.1 Análise de Índices Magnéticos

Inicialmente foram realizadas análises da variação dos índices de atividade magnética, discutidos na Seção 2.4, para períodos de interesse. Para isso, foi utilizado o *software* gráfico para análise de dados e estatística *OriginPro*. Um exemplo dessa análise pode ser visto na Figura 4.1. Os gráficos mostram a variação do índice Dst e Kp em função do tempo durante uma tempestade geomagneticamente intensa (de acordo com a definição presente na Tabela 2.4) que ocorreu nos dias 6, 7, 8 e 9 de setembro de 2017

Figura 4.1 – Índices Dst e Kp durante 6-9 de setembro de 2017.



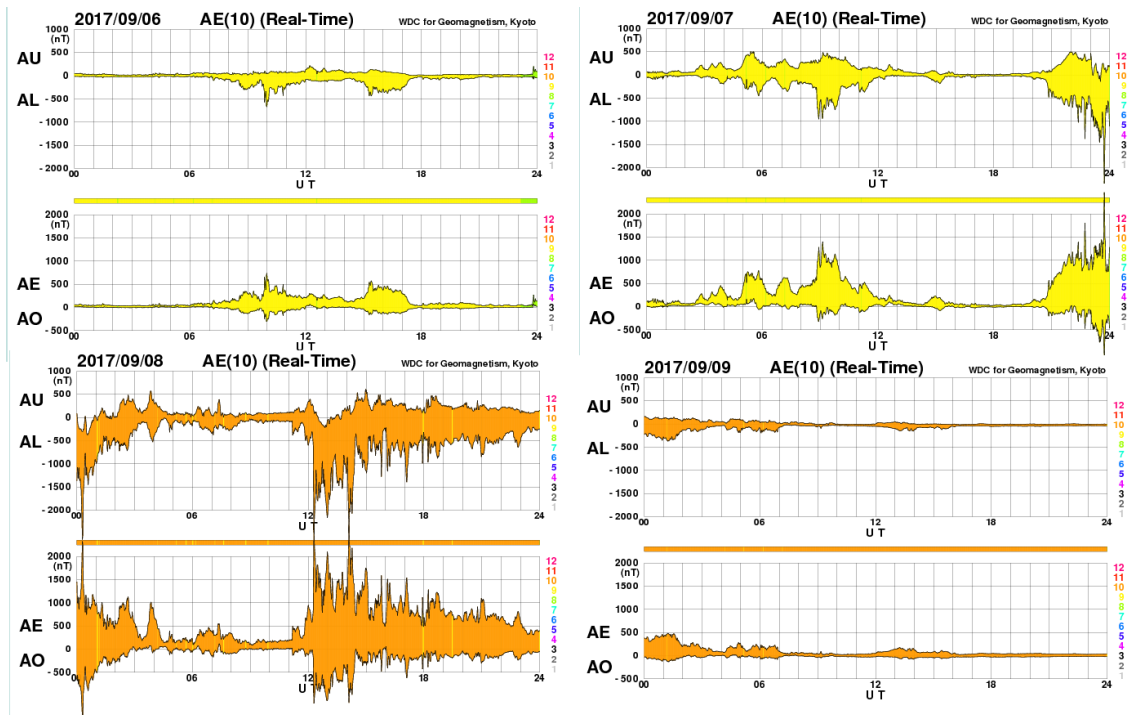
Fonte: Produção do autor.

Os índices Dst e Kp mostram de forma clara as fases da tempestade geomagnética. O dia 6 de setembro de 2017 apresentou condições calmas

segundo os índices, com algumas oscilações em torno do zero para o índice Dst e menor que 3 para o índice Kp. Logo antes da meia noite, percebe-se uma alta no índice Kp, indicando mudanças nas condições geomagnéticas. Nesse mesmo momento o índice Dst reflete a energização da Magnetosfera decorrente da fase de alerta da tempestade. A fase principal ocorre no dia seguinte, 8 de setembro, onde o Dst atinge valores de até -140 nT, classificando a tempestade como intensa. A variação do índice Kp, acompanha a do Dst, atingiu o valor de 8, o que é motivo de preocupação, pois indica possibilidade de danos e interferências em equipamentos tecnológicos. Na metade do dia 8, durante a fase de recuperação, pode-se notar um pico no Dst que é consequência de uma subtempestade magnética deflagrada nesse momento.

Na Figura 4.2 estão apresentados os parâmetros interplanetários AE, AO, AU, AL para o período de interesse gerados através do WDC, Kyoto. O índice AE, como comentado na Seção 2.5, é uma medida da atividade magnética na região auroral. O índice AE pode ser calculado como a diferença entre dois outros índices apresentados na Figura 4.2, AE e AL. Esses índices destinam-se a expressar máxima perturbação magnética gerada pelos Eletrojetos Aurorais Leste e Oeste, respectivamente. Já o índice AO, que também é apresentado na Figura 4.2, fornece uma medida da corrente zonal equivalente.

Figura 4.12 – índices AU, AL, AO durante 6-9 de setembro de 2017.



Fonte: Produção do autor.

Nota-se o momento da deflagração da subtempestade magnética durante a fase de recuperação pela variação abrupta do índice AE na metade do dia 8. Este índice tem picos de valores próximos de 2.000 nT, valor típico para subtempestades magnéticas, como descrito na Seção 2.3.3.

4.2 Desenvolvimento de Rotinas de Programação em IDL

O desenvolvimento das rotinas de análise e processamento de dados magnéticos realizados nesse projeto seguem três passos básicos. Inicialmente é feito um estudo das rotinas já existentes para pré-processamento dos dados de magnetômetro. Em seguida é feita a determinação das QDC e, finalmente, a definição dos parâmetros de interesse e desenvolvimento da rotina propriamente dita.

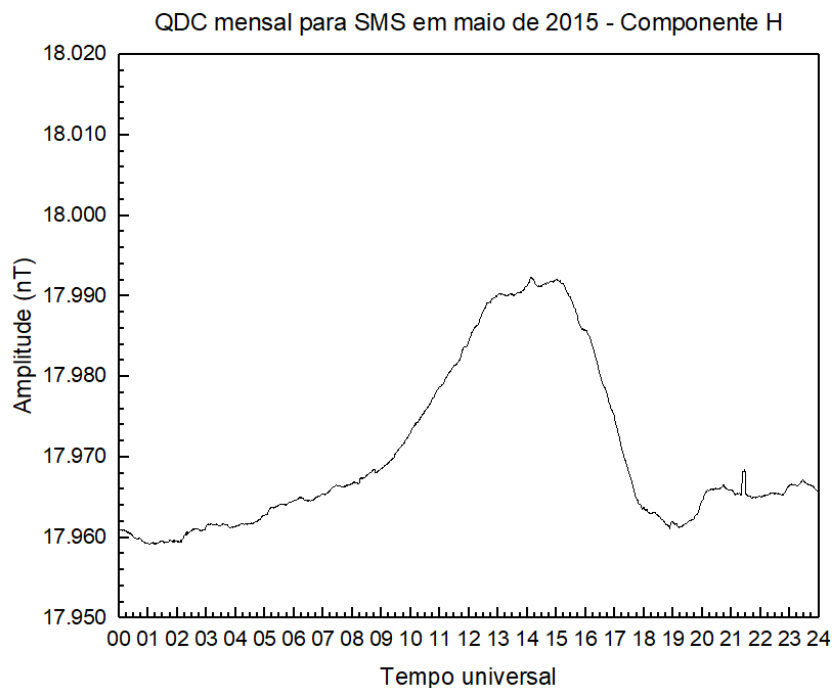
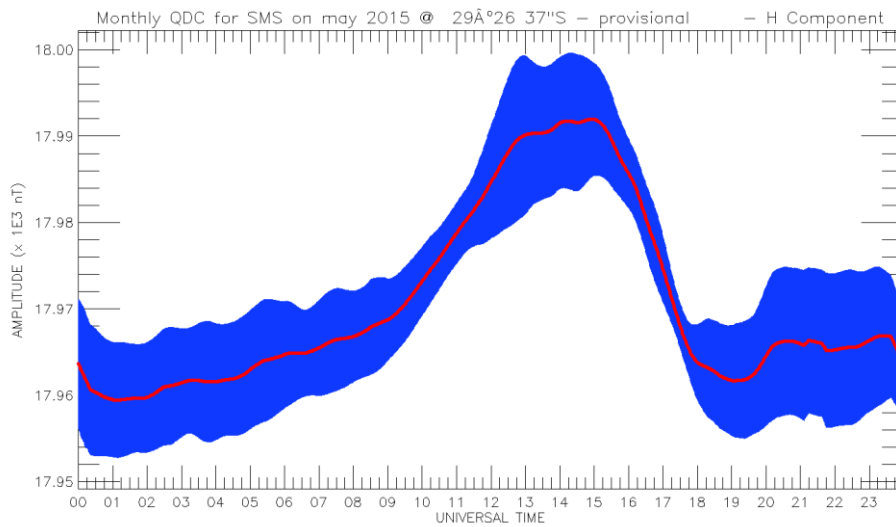
Em princípio, estuda-se métodos de pré-processamento de dados. Nesse caso foram os métodos de filtragem dos dados de magnetômetro utilizados para obter

as QDCs. Esse método calcula a QDC para um dado mês utilizando os valores das componentes H , D e Z do campo magnético da Terra medido por um magnetômetro em uma dada estação. O próximo passo é a seleção dos cinco dias mais calmos do mês para o cálculo da média. Foram processadas algumas QDCs com dados de magnetômetros por meio do *software OriginPro*, utilizadas como linha de base para verificação dos resultados obtidos pelas rotinas de processamento de QDC. As QDCs foram obtidas para um período de interesse utilizando os dados da estação de São Martinho da Serra (SMS).

Desenvolveu-se uma rotina para determinar o nível de ruído da curva média da variação diária da componente H do campo geomagnético, obtida anteriormente, utilizando algoritmos tradicionalmente aplicados para processar dados de radar ionosférico. Esse ruído é então subtraído da variação média diária e aqueles valores que estão abaixo desse limite são substituídos por um valor não numérico, restando apenas os valores da variação do campo geomagnético salvos em um novo vetor de dados com maior potencial de análise. O próximo passo é desenvolver uma rotina que utiliza de algoritmos da mesma classe dos anteriores para fazer um ajuste Gaussiano e determinar os parâmetros da distribuição normal da curva subtraída do ruído, como os horários de início e fim da observação, bem como a intensidade máxima e mínima do campo geomagnético.

A Figura 4.3 mostra uma comparação entre a QDC feita utilizando a rotina em IDL (painel superior) e a QDC (painel inferior) calculada com software gráfico de análise de dados para maio de 2015 em SMS.

Figura 4.3 – Análise de confiabilidade das QDC geradas pela rotina em IDL.

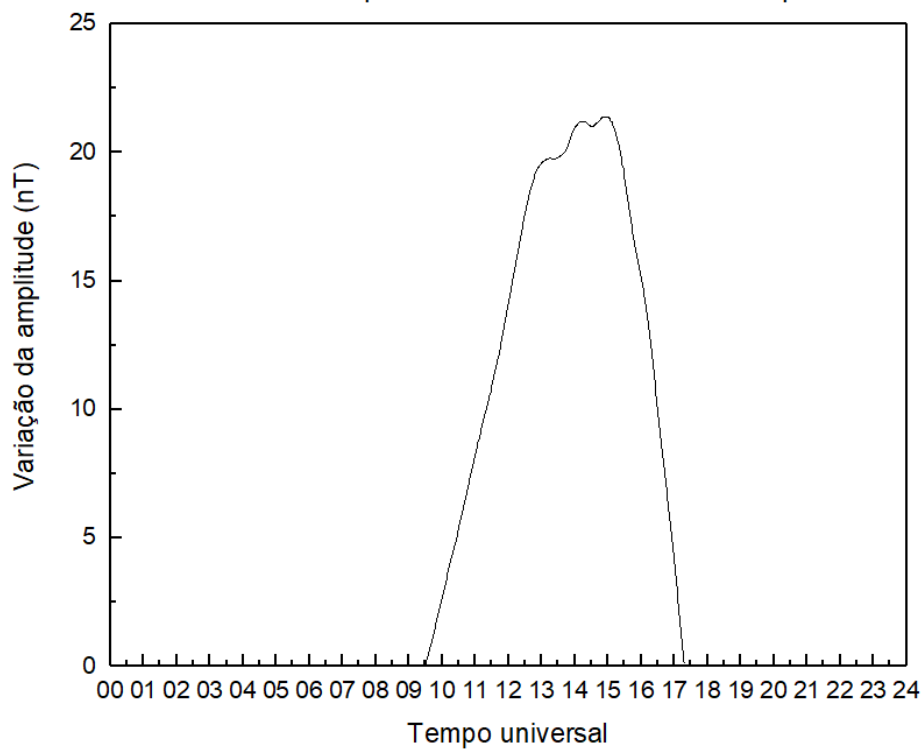


Fonte: Produção do autor.

Nota-se que, apesar de uma forma geral coerente, há certa discrepância entre os gráficos, pois no gráfico superior há alguns pontos mais “espetados” que não ocorrem no gráfico de baixo. Isso se deve a uma sub-rotina própria do IDL que

atua de forma a suavizar tais pontos fora da curva. Ao aplicar a técnica desenvolvida nessas QDCs encontra-se o resultado apresentado na Figura 4.4.

Figura 4.4 – QDC para maio de 2015 em SMS após suavização.



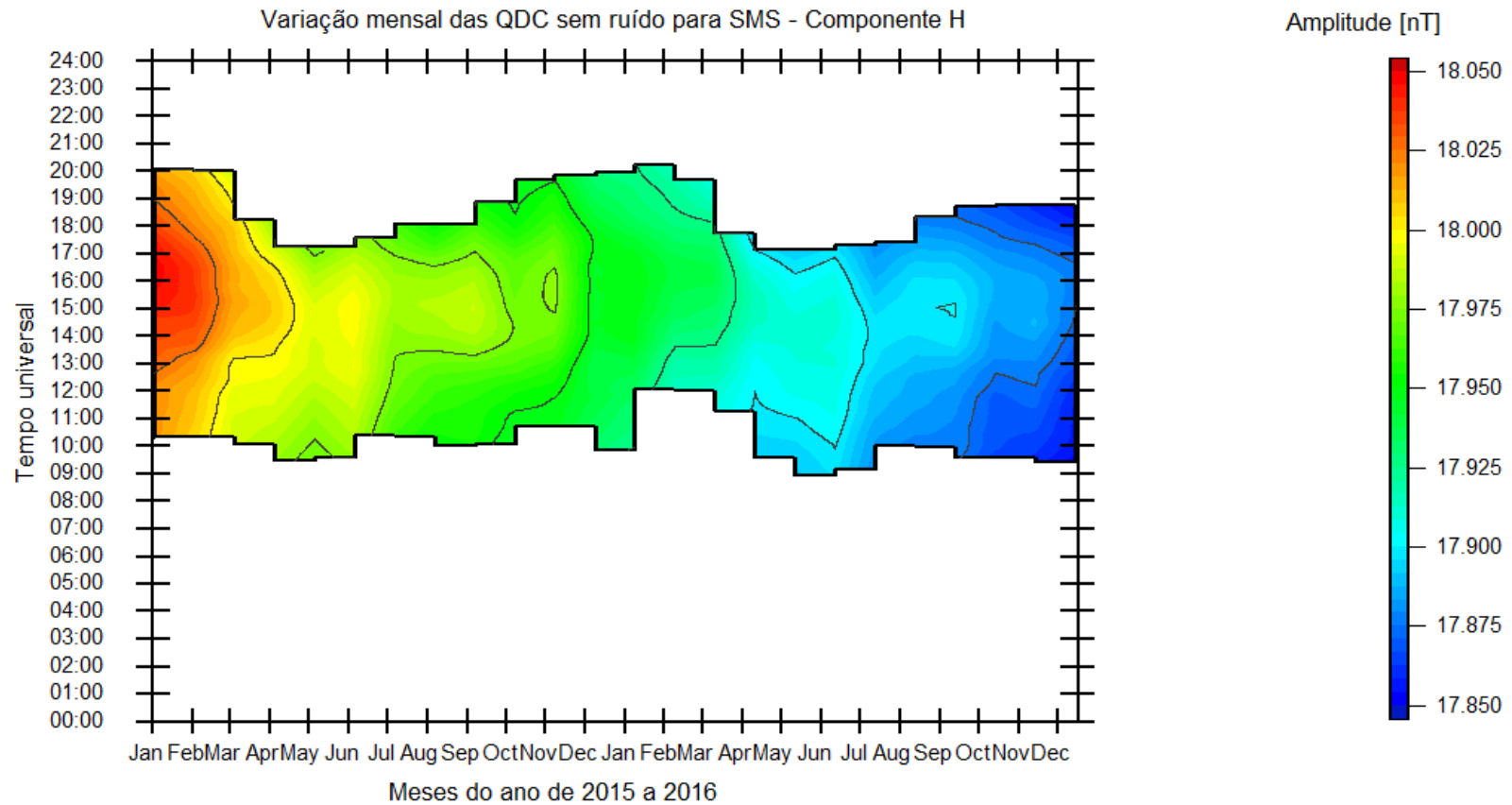
Fonte: Produção do autor.

Após a aplicação da rotina em IDL, o gráfico gerado apresenta apenas os valores acima do valor definido como ruído, como esperado. Dessa forma é possível analisar o horário em que ocorre o máximo valor da curva, momento onde ela diminui de intensidade, entre outros.

A técnica desenvolvida foi aplicada inicialmente nos dados do magnetômetro instalado no Observatório Espacial do Sul (OES/CRS/COCRE/INPE-MCTIC, 29° S, 53° O), em São Martinho da Serra, RS, coletados entre junho de 2015 e julho de 2016 e será plicado, em atividades futuras, nos demais magnetômetros da Rede Embrace.

A Figura 4.5 apresenta o mapa de contorno da variação da componente H , entre janeiro de 2015 e dezembro de 2016, obtido por meio do processamento dos dados de magnetômetro com o procedimento descrito até o momento. É possível observar a diferença na máxima intensidade do campo magnético nas QDCs para o mesmo período em anos diferentes. Há uma variação de amplitude de cerca de 100 nT para janeiro de 2015 e janeiro de 2016. Isso deve-se à menor atividade solar no período devido ao ciclo solar que estava em baixa. Também é possível notar a maior intensidade do campo geomagnético nos meses de verão no hemisfério na qual está localizada a estação graças a maior exposição à radiação solar. Além disso, nesses meses a curva começa e termina mais tarde com o inverso acontecendo nos meses de inverno, embora o pico se mantenha por volta das 15 horas ao longo de todo o período. A remoção do ruído é determinante para essa última análise, pois permite identificar pontualmente esses horários.

Figura 4.5 – Variação mensal das QDC processadas pela técnica de remoção de ruído para SMS.



Fonte: Produção do autor.

5 CONCLUSÕES E ATIVIDADES FUTURAS

Nesse trabalho foi possível observar a influência da atividade geomagnética durante uma tempestade geomagnética classificada como intensa nos índices geomagnéticos. A tempestade magnética ocorreu em setembro de 2015 e sua análise mostrou que o Kp atingiu um valor de 8 e o Dst atingiu um pico de 29 nT e um mínimo de 140 nT.

Com relação as análises dos dados de magnetômetros, foi desenvolvida uma técnica de remoção de ruído para a construção das QDCs. A remoção do ruído permite uma melhor análise da evolução mensal dessas curvas, conforme mostram as Figuras 4.3 e 4.4.

Finalmente, foi possível realizar um estudo sazonal das QDCs de janeiro de 2015 a dezembro de 2016 como mostrado na Figura 4.5. Identifica-se claramente a variação do ciclo solar, bem como a influência das estações do ano na variação da amplitude do campo geomagnético e o momento de início e fim da QDC.

As atividades futuras relacionadas a essa pesquisa envolvem, com relação a técnica desenvolvida, a combinação das rotinas de remoção do ruído e ajuste Gaussiano, novo processamento dos dados e análise sazonal dos dados e repetição do método para outras estações da Rede Embrace. Com isso, espera-se identificar a influência do Eletrojato e Contra Eletrojato Equatorial na variabilidade, fenomenologia e eletrodinâmica da região E equatorial em períodos geomagneticamente calmos e perturbados ao aplicar a técnica em dados de estações sobre a influência dessas correntes. Acredita-se que os resultados do projeto poderão ser utilizados no desenvolvimento de produtos do clima espacial e apresentados em congressos científicos nacionais, internacionais, e artigos indexados. As atividades futuras também preveem um estudo do campo geomagnético por meio do modelo *International Geomagnetic Reference Field* (IGRF) para verificar a sua capacidade de prever o comportamento do campo geomagnética, e uma análise comparativa entre dados magnéticos e informações providas por outros instrumentos científicos como radar coerente e Digissonda.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BHARGAVA, B.N.; SASTRI N.S., A comparison of days with and without occurrence of Counter Electrojet afternoon events in the Indian Region. **Ann. Geophys.** v. 33, p. 329–333 , 1977.
- COSTA JR. E; SIMÕES JR. F.J.R.; CARDOSO F.R.; ALVES M.V. O vento solar e a atividade geomagnética, **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 33, n. 4, 4301. ISSN (1806-1117). 2011.
- DE SOUZA L. S. **Tempestade geomagnéticas: origens e consequências**. 2013. Dissertação em Física - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012.
- DENARDINI, C. M.; CHEN, S. S., RESENDE; L. C. A., MORO, J.; BILIBIO, A. V.; FAGUNDES, P. R., ET AL. The embrace magnetometer network for South America: First scientific results. **Radio Science**, v. 53, p. 379–393. 2018.
- DENARDINI, C. M.; CHEN, S. S.; RESENDE, L. C. A.; MORO, J., BILIBIO; A. V., FAGUNDES; P. R., ET AL. The Embrace Magnetometer Network for South America: network description and its qualification. **Radio Science**, v. 53, p. 288–302. 2018.
- 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. ISSN 1809-4511.
- DORMAND J. R.; WOOLFSON M.M. The capture theory and planetary condensation. **Mon. Not. R. Astr. Soc.** v. 151, p. 307. 1971. Disponível em: <<http://adsabs.harvard.edu/full/1971MNRAS.151..307D>>. Acesso em: 26 jun. 2018.
- DX CLUBE DO BRASIL. **Lição 2 – A Terra e a sua ionosfera**. Disponível em: <<https://www.ondascurtas.com/cursos/propagacao/a-terra-e-a-sua-ionosfera/>>. Acesso em: 26 jun. 2018.
- EDDY, J. A. **The Sun, the Earth, and near-Earth space**. Washington, D.C. National Aeronautics and Space Administration, 2009. ISBN (1521077673).
- EXTREME ULTRAVIOLET IMAGING TELESCOPE (EIT). **The Sun now**. 26 jun. 2018. 1 fotografia, color. 395x395 px. Disponível em: <http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/The_Sun_now>. Acesso em: 26 jun. 2018.
- HARGREAVES, J. K. **The solar-terrestrial environment**. Cambridge, Cambridge University Press, 1992. ISBN (9780511628924).

HILL, S, SOHO, NASA/ESA. **A complete solar cycle from SOHO**. 2007. 1 fotografia, color. 800x600 px. Disponível em: <https://apod.nasa.gov/apod/image/0712/solarcycle_soho.jpg>. Acesso em: 26 jun. 2018.

J. BARTELS; H.F. JOHNSTON. Geomagnetic tides in horizontal intensity at Huancayo. **Terr. Magn. Atmos. Electr.** v. 45, p. 269–308. 1940. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1029/TE045i003p00269>>. Acesso em: 26 jun. 2018.

KIRCHHOFF, V. W. J. H. **Introdução à geofísica espacial**. São Paulo, Nova Stella - EDUSP, 1991. ISBN (8572330011).

KIVELSON, M. G., RUSSELL C.T. **Introduction to space physics**. Cambridge, Cambridge University Press, 1995. ISBN (0521457149, 9780521457149).

KIVELSON, M. G., MARGARET G. **Introduction to space physics**. Cambridge, Cambridge University Press, 2005. ISBN (1316264661, 9781316264669).

LINDSEY, R. NASA IMAGE AND ANIMATION FROM THE GODDARD SPACE FLIGHT CENTER SCIENTIFIC VISUALIZATION STUDIO AND THE SOLAR DYNAMICS OBSERVATORY. **Prominence from the solar dynamics observatory**. 21 abr. 2010. 1 fotografia, color. 720x480 px. Disponível em: <<http://visibleearth.nasa.gov/view.php?id=43717>>. Acesso em: 26 jun. 2018.

MORO, J. **Absorção ionosférica do ruído cósmico utilizando dados de riômetros da rede SARINET**. 2011. 159 p. IBI: <8JMKD3MGP7W/393UJCB>. (sid.inpe.br/mtc-m19/2011/01.27.18.33-TDI). Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial/Ciências do Ambiente Solar-Terrestre) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2011. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/393UJCB>>. Acesso em: 26 jun. 2018.

MORO, J. **Variações longitudinais dos campos elétricos do Eletrojato Equatorial no setor americano**. 2015. 171 p. IBI: <8JMKD3MGP3W34P/3HRKKTS>. (sid.inpe.br/mtc-m21b/2015/01.28.15.49-TDI). Tese (Doutorado em Geofísica Espacial/Ciências do Ambiente Solar-Terrestre) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2015. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3HRKKTS>>. Acesso em: 26 jun. 2018

NASA/SDO/ GODDARD'S SCIENTIFIC VISUALIZATION STUDIO. **Multiple wavelengths of X4.9-class solar flare**. 24 fev. 2014. 1 fotografia, color. 1024x768 px. Disponível em: < <https://www.nasa.gov/content/goddard/multiple-wavelengths-of-x49-class-solar-flare/#.WzKmdadKi01>>. Acesso em: 26 jun. 2018.

NASA/SDO/GSFC. **How SDO sees the sun**. 22 jan. 2013. 1 fotografia, color. 985x739 px. Disponível em: < <https://www.nasa.gov/content/goddard/how-sdo-sees-the-sun> >. Acesso em: 26 jun. 2018.

NASA/SDO/AIA/HMI/GODDARD SPACE FLIGHT CENTER. **SDO observes fast-growing sunspot**. 19-20 fev. 2013. 1 fotografia, color. 1024x768 px. Disponível em: < <https://svs.gsfc.nasa.gov/vis/a010000/a011200/a011211/>>. Acesso em: 26 jun. 2018.

RASTOGI R.G.; PATEL V.L. Effect of interplanetary magnetic field on ionosphere over the magnetic equator. **Proc. Indian Acad. Sci.** v. 82, p. 121–141. 1975.

RISHBETH, H.; GARIOTT, O. G. **Introduction to ionospheric physics**. New York: Academic Press, 1969. 331p.

ROSTOKER, G. Geomagnetic indices. **Reviews of Geophysics**. v. 10, n. 4, p. 935. 1972.

RUSSELL, C.T. The solar wind interaction with the Earth's magnetosphere: a tutorial. **IEEE Transactions on Plasma Science**. v. 28, n. 6, p. 1818-1830. 2000.

SCHUNK, R. W.; NAGY, A. F. **Ionospheres: physics, plasma physics, and chemistry**. New York: Cambridge University Press, 2000. Cambridge Books. ISBN 9780511551772.

STENING R.J.; MEEK C.E.; MANSON A.H. Upper atmosphere wind systems during reverse Equatorial Electrojet events. **Geophys. Res. Lett.** v. 23, p. 3243–3246. 1996.

TANDBERG-HANSSSEN, E.; EMSLIE, A. GORDON. **The physics of solar flares**. Cambridge, Cambridge University Press. 1988. ISBN (0521115523, 978-0521115520).

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL (UFRGS). **O espectro eletromagnético**. Disponível em: <<http://www.if.ufrgs.br/oei/cgu/espec/intro.htm>>. Acesso em: 26 jun. 2018.

WIESEMANN K. **A short introduction to plasma physics**. Senec, Slovakia. 2012. Lecture Notes, CERN Course on Ion Sources

WOOLFSON M.M. The origin and evolution of the solar system. **Astronomy & Geophysics**. v. 41, p 1.12-1.19. 2000.