



UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL

**ESTUDO DOS EFEITOS DE EXPLOSÕES SOLARES NA REGIÃO D
IONOSFÉRICA POR MEIO DE ONDAS EM VLF**

Adriano Magno Rodrigues da Silva

**Campina Grande-PB
2017**

ADRIANO MAGNO RODRIGUES DA SILVA

**ESTUDO DOS EFEITOS DE EXPLOSÕES SOLARES NA REGIÃO D
IONOSFÉRICA POR MEIO DE ONDAS EM VLF**

Dissertação de Mestrado apresentado ao Programa de pós-graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental da Universidade Estadual da Paraíba, em cumprimento às exigências parciais para obtenção do título de mestre em ciência e tecnologia ambiental.

Orientadores:

Prof. Dr. Edvaldo de Oliveira Alves

Prof. Dr. Fernando Celso Perin Bertoni

**Campina Grande-PB
2017**

É expressamente proibida a comercialização deste documento, tanto na forma impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que na reprodução figure a identificação do autor, título, instituição e ano da dissertação.

S586e Silva, Adriano Magno Rodrigues da.
Estudo dos efeitos de explosões solares na Região D ionosférica por meio de ondas em VLF [manuscrito] / Adriano Magno Rodrigues da Silva. - 2017.
63 p. : il. color.

Digitado.

Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental) - Universidade Estadual da Paraíba, Pró-Reitoria de Pós-Graduação e Pesquisa, 2017.

"Orientação: Prof. Dr. Edvaldo de Oliveira Alves, Pró-Reitoria de Pós-Graduação e Pesquisa".

"Co-Orientação: Prof. Dr. Fernando Celso Perin Bertoni, Departamento de Física".

1. Técnicas de VLF. 2. Evento ionosférico. 3. Explosão solar. 4. Região D. I. Título.

21. ed. CDD 539.722 2

ADRIANO MAGNO RODRIGUES DA SILVA

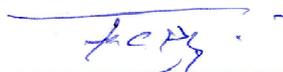
**ESTUDO DOS EFEITOS DE EXPLOSÕES SOLARES NA REGIÃO D
IONOSFÉRICA POR MEIO DE ONDAS EM VLF**

Aprovado em 28 de Abril de 2017

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Edvaldo de Oliveira Alves
(Orientador - Universidade Estadual da Paraíba - UEPB)



Prof. Dr. Fernando Celso Perin Bertoni
(Orientador - Universidade Estadual da Paraíba - UEPB)



Prof. Dra. Ana Roberta da Silva Paulino
(Examinador Externo - Universidade Federal de Campina Grande - UFCG)



Prof. Dr. Lourivaldo Mota Lima
(Examinador Interno - Universidade Estadual da Paraíba - UEPB)

Campina Grande-PB
2017

*À minha esposa e filho,
demais familiares, dedico.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, bondoso Pai;

Aos orientadores, demais professores do programa e membros da banca;

Aos queridos Wellington Rodrigues e Stefane Colman, pela revisão e tradução do texto;

Ao colega Antonio Carlos, pela contribuição no tratamento dos dados;

Aos corajosos Jaruseyk Fidelis e Aderson Rodrigues, que "decidiram" estar juntos comigo;

Aos indescritíveis colegas de trabalho que supriram minhas ausências;

Ao professor Álvaro Luis pelo incentivo e apoio necessários;

Aos meus pais e toda irreverente família Rodrigues, pelo bom caminhar nesta vida;

A presença intensa e animadora do meu filho Heitor Magno;

A minha amada esposa Fabíola Terto, pela atenção, compreensão e boa companhia.

*“Combati o bom combate,
terminei a carreira, preservei a fé.”*

Apóstolo Paulo

RESUMO

A Região D é a porção mais baixa da Ionosfera e a sua formação depende da Radiação Solar, principalmente a Lyman- α . Por esse motivo, tal região existe apenas durante o dia. Sabe-se que uma explosão solar emite raios X, os quais são capazes de penetrar até a Região D e aumentar o nível de ionização, provocando o seu rebaixamento. Uma vez que a Região D comporta-se como fronteira do Guia de Onda Terra-Ionosfera, qualquer modificação nela produz variações importantes, tanto na amplitude como na fase de sinais de rádio em *Very Low Frequency* (VLF). Nesta Pesquisa, foram utilizadas medições dos fluxos de raios X, obtidos por meio do Satélite *Geostationary Operational Environmental Satellite* e dados de VLF correspondentes ao período do mês de março de 2011 e Julho de 2012, obtidos da rede *South America VLF Network*. Os trajetos dos sinais de VLF escolhidos correspondem à Estação Transmissora NAA em Cutler, nos Estados Unidos da América e duas Estações Receptoras na América do Sul: Estação ATI em Atibaia no Brasil e a Estação PLO em Punta Lobos, no Peru. Os dados de VLF permitem, por meio das alterações, tanto na amplitude como na fase dos sinais, juntamente com os dados de fluxo de raios X, identificar eventos ionosféricos promovidos pelas explosões solares. Os resultados deste estudo indicam que as alterações ocorridas nos sinais analisados aconteceram devido a um rebaixamento da Região D, ocasionado pela ionização advinda da emissão de raios X das Explosões Solares. Um dos eventos analisados ocorreu a partir das 18h08min UT do dia 08/03/2011 e houve por volta das 18h28min UT, o momento de maior emissão de raios X. Os incrementos nas amplitudes dos sinais, relativamente ao estado de pré-evento, foram de até 11,43% para o trajeto entre NAA–ATI e de até 12,13% para o trajeto NAA–PLO durante a Explosão Solar descrita.

Palavras-chave: *Técnicas de VLF, Evento Ionosférico, Explosão Solar, Região D.*

ABSTRACT

The D Region is the lowest portion of Ionosphere and its formation depends on the solar radiation, mainly of Lyman- α . Because of this, the D Region only exists during the day. A solar flare releases X-Rays, which are able to penetrate into the D Region and increase the ionization level, consequently inducing its lowering. Once the D Region act as a boundary of Earth-Ionosphere Waveguide, any modification produces important variations both in Very Low Frequency (VLF) radio signals amplitude and in phase. For this research was used X-Rays flow measurements obtained from the Geostationary Operational Environmental Satellite and VLF data during the period of March (2011) and July (2012), obtained by South America VLF Network. These chosen VLF signal paths correspond to the NAA Transmitter Station in Cutler, USA, and from two Receptor Stations in South America: ATI Station in Atibaia, Brazil, and the PLO Station at Punta Lobos, Peru. The VLF data allows through alterations, both in signal amplitude and in phase, alongside with X-Rays flows data to identify Ionospheric events caused by solar flares. The results of this study indicate alterations occurred in analyzed signals; this happened because of the D Region lowering caused by ionization, which came from X-Rays released through Solar Flares. One of these analyzed events started at 6:08 p.m. UTC on March 8th, 2011, and peak X-Ray release at 6:28 p.m. UTC. The signal's amplitude increments on the pre-event state was until 11.43% to the route: NAA-ATI, and until 12.13% to the route: NAA-PLO during the mentioned Solar Flare.

Keywords: VLF techniques, Ionospheric disturbances, Solar Flare, D Region.

LISTA DE FIGURAS

3.1	Imagem do Sol.....	17
3.2	Diagrama de Hertzsprung-Russel.....	19
3.3	Estrutura do Sol.....	20
3.4	Imagem da Fotosfera do Sol	22
3.5	Imagem da Cromosfera do Sol.....	23
3.6	Mancha Solar, imagem captada em 07/01/2014.....	25
3.7	Imagem de uma Explosão Solar em 26/jun/1992.....	27
3.8	Perfis da Ionosfera em fases de mínima e máxima atividade solar e em períodos diurno e noturno.....	29
4.1	Antenas da Estação da SAVNET em Punta Lobos, Peru.....	40
4.2	Apresentação de um exemplo dos dados de ondas em VLF.....	42
4.3	Receptores de VLF em Atibaia (ATI) e Punta Lobos (PLO) e Transmissor de VLF em Cutler (NAA) e Trajetos NAA-PLO e NAA-ATI.....	43
4.4	Interface do programa GeoClock 9.0, que mostra a parcela iluminada da superfície da Terra para determinado horário do dia, indicando ainda a posição do Sol e da Lua.....	45
5.1	Interface do programa GeoClock 9.0, que exibe a parcela iluminada da superfície da Terra e os trajetos NAA-ATI e NAA-PLO, no momento que inicia a explosão solar.....	48
5.2	Fluxos de raios X em dois canais de emissões distintas, sendo eles: o canal de 0,5Å a 4Å e o canal de 1Å a 8Å.....	48
5.3	Fluxos de partículas em três níveis de energia, para o período de 6/03/11 a 8/03/11.....	49
5.4	Regiões Ativas na superfície solar, durante a explosão ocorrida no dia 08/03/2011	50
5.5	Explosão solar registrada no dia 08/03/2011 às 18h08 UT.....	51

5.6	Variação da amplitude e fase de sinais de rádio em VLF propagantes no trajeto NAA-ATI, para o dia médio quiescente, para o dia 08/03/2011 e o resíduo entre estes dois dias.....	53
5.7	Fluxos de raios X em dois canais distintos de emissões, plotados no mesmo eixo, para o dia 8/03/11.....	54
5.8	Variação da amplitude e fase de sinais de rádio em VLF propagantes no trajeto NAA-PLO, para o dia 08/03/11, para um dia médio quiescente e o resíduo entre estes.....	56
5.9	Gráfico da correlação entre os avanços normalizados de fases de seis explosões solares no dois trajetos distintos.	59

LISTA DE TABELAS

3.1	Informações sobre o Sol.....	18
3.2	Classificação das faixas de emissão das explosões solares.....	26
4.1	Localização geográfica das Estações utilizadas.....	42
4.2	Extensões dos trajetos escolhidos.....	44
5.1	Medidas do ganho na amplitude do sinal durante uma explosão solar, para dois trajetos	57
5.2	Informações sobre os conjunto de explosões analisadas	58
5.3	Descrição do conjunto de explosões analisadas	59

LISTA DE EQUAÇÕES

3.1	Equação de Max Plank	21
3.2	Varição da densidade eletrônica.....	31
3.3	Função de Chapman.....	31
3.4	Função de produção de Chapman.....	32
3.5	Taxa de recombinação eletrônica	33
3.6	Taxa de produção de íons e elétrons livres.....	33
3.7	Densidade de íons positivos e negativos.....	34
3.8	Taxa de produção de íons e elétrons livres.....	34
3.9	Relação de grandeza entre os coeficientes de recombinação eletrônica e iônica.....	34
3.10	Taxa de produção de íons e elétrons livres.....	34
3.11	Equação de Appleton.....	35

SUMÁRIO

1.0	INTRODUÇÃO.....	14
2.0	OBJETIVOS.....	16
3.0	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	17
3.1	O SOL.....	17
3.2	ATIVIDADE SOLAR.....	24
3.3	EVENTOS SOLARES.....	25
3.4	IONOSFERA TERRESTRE.....	28
3.5	REGIÃO D: FORMAÇÃO E COMPOSIÇÃO.....	30
3.6	PROPAGAÇÃO DE ONDAS ELETROMAGNÉTICAS DE FREQUÊNCIAS MUITO BAIXAS.....	35
3.7	INVESTIGAÇÕES DE PERTURBAÇÕES OCASIONADAS POR EXPLOSÕES SOLARES NA REGIÃO D, POR MEIO DE ONDAS DE RÁDIO EM VLF.....	37
4.0	MATERIAIS E MÉTODOS.....	39
5.0	RESULTADOS E DISCUSSÕES	47
6.0	CONCLUSÕES	61
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	62

1.0 INTRODUÇÃO

O Planeta Terra tem uma camada de gases que promove as condições de vida e exerce a função de proteção natural contra diversos eventos advindos do espaço, como por exemplo, os Meteoróides, Raios Cósmicos e Radiação Solar excessiva. A camada de gases é denominada de Atmosfera que, segundo Andrews (2010), é constituída por uma mistura de gases que se comportam como um gás ideal, sendo o Nitrogênio e o Oxigênio moleculares predominantes neste volume, que ainda tem como constituintes minoritários o Dióxido de Carbono, Vapor de água, Ozônio entre outros.

Algumas classificações para as camadas da Atmosfera são propostas, de acordo com parâmetros específicos, como a variação do perfil de temperatura, dessa forma, a Atmosfera pode ser subdividida na seguintes camadas: Troposfera, Estratosfera, Mesosfera e Termosfera. Relativamente à mistura dos gases constituintes, a Atmosfera terrestre pode ser classificada em Heterosfera, região da Atmosfera em que há estratificação dos seus componentes, já a Homosfera, região em que a mistura dos gases é considerada homogênea. Além das classificações expostas, a Atmosfera também pode ser classificada de acordo com a concentração de Íons. A região onde essas concentrações são maiores é denominada de Ionosfera , começando a partir de 60 km de altitude.

A Ionosfera é constituída de regiões que têm como características distintas a altitude e a composição iônica, podendo ser classificadas como as regiões: F₂, F₁, E e D. A Região D é essencialmente diurna e ocorre em média entre 60 km e 95 km de altitude, sendo a região mais baixa da Ionosfera. Além da ionização por contato, um outro meio de produção de íons é a fotoionização, produzida por algumas fontes e, entre elas, a emissão de Lyman- α , raios X, raios cósmicos e de partículas advindas do Sol (HARGREAVES,1992).

A principal fonte da energia que é absorvida pela Atmosfera é o Sol, muito embora interações com a superfície da Terra e do Mar sejam consideráveis. O Sol é uma estrela média que tem como fonte de energia as fusões nucleares do Hidrogênio que produz o Hélio como subproduto. A Explosão Solar é um dos maiores fenômenos em termos de liberação de energia no Sistema Solar e ocorre quando uma grande quantidade de energia acumulada no campo magnético do Sol é liberada, ocasionando um brilho intenso na região da mancha solar em que ocorre o evento, emitindo radiação em todo o espectro eletromagnético (MITRA, 1974). A energia proveniente da explosão solar é absorvida pela Ionosfera e interage de maneira distinta em cada uma de suas camadas. Sendo a Região D a mais baixa, a emissão em

raios X pode interagir de maneira mais significativa com ela, pelo simples fato de esse tipo de radiação ter uma grande capacidade de penetração.

Para desenvolver pesquisas sobre os efeitos da explosão solar na Região D, uma boa metodologia é o uso de Técnicas de Propagação de Ondas de frequência muito baixa, *Very Low Frequency* (VLF), uma vez que a região a ser estudada é inacessível a outras técnicas, como por exemplo, Balões Meteorológicos, que não atingem essa região e os Satélites que apresentam limitações em suas medições, por terem suas órbitas em regiões bem superiores (RAULIN et al., 2010).

O uso de VLF se constitui em uma técnica importante para a descrição da Região D ionosférica, uma vez que as ondas se propagam em um guia limitado pela superfície da Terra e a Região D. As alterações ocorridas na amplitude e fase do sinal são usadas para descrever as características elétricas do Plasma, localizado na região ionosférica mais baixa que durante o dia é a Região D (RAULIN et al., 2010).

2.0 OBJETIVOS

2.1 Geral

Investigar os efeitos da explosão solar na Região D ionosférica por meio de ondas em VLF.

2.2 Específicos

- Monitorar as alterações dos parâmetros do sinal VLF durante a explosão solar;
- Usar os resultados obtidos para constatar a variação da altura da Região D ionosférica, durante a explosão solar;
- Estudar os efeitos da alteração na densidade elétrica da Região D, durante a explosão solar;

3.0 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 O Sol

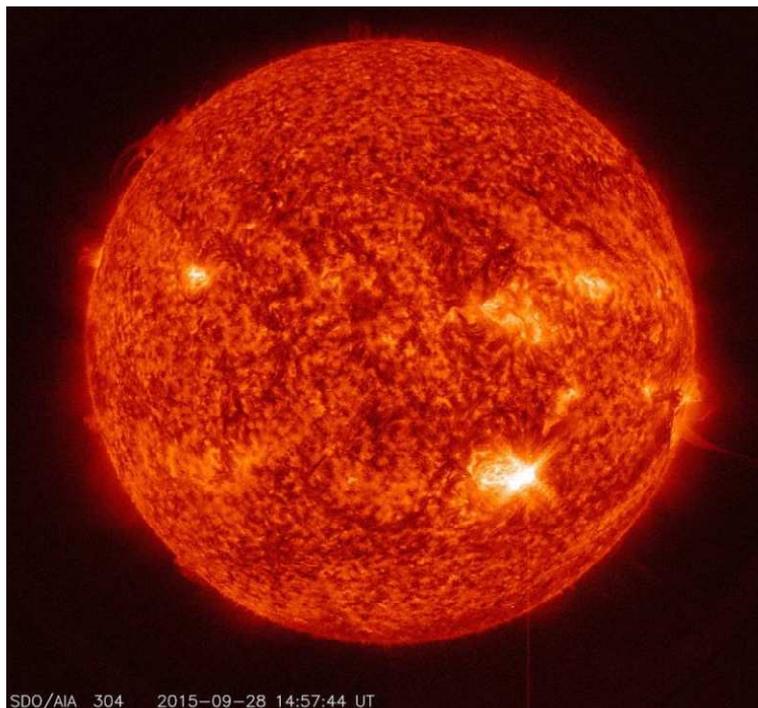
A Terra é o planeta do Sistema Solar com as condições mais favoráveis à existência de vida. Alguns fatores são propícios a esta condição, como, por exemplo, existência de água, Atmosfera com Oxigênio, Gás Carbônico e temperatura adequada. Nesse sentido, o Sol é primordial para que haja vida na Terra, propiciando, assim, a formação dos padrões climáticos e as condições para manutenção da vida.

Diante dessa relação de dependência estabelecida entre a Terra e o Sol, pode-se afirmar que o comportamento dessa Estrela influencia a existência do planeta Terra.

3.1.1 Características Gerais

O Sol é uma estrela (Figura 3.1) que emite radiação eletromagnética em uma ampla faixa de frequência, tendo um fluxo contínuo de plasma e rajadas de partículas energéticas (HARGREAVES, 1992), com idade aproximada de $4,5 \times 10^9$ anos e temperatura média de superfície 5700 K. Na Tabela 3.1, estão expostas algumas características do Sol.

Figura 3.1- Imagem do Sol



Fonte: NASA

https://www.nasa.gov/sites/default/files/styles/full_width/public/thumbnails/image/20150928_145744_4096_0304.jpg?itok=yEnhP2Yr

Tabela 3.1- Informações sobre o Sol

Massa	$M = 1,989 \times 10^{30} \text{ kg}$
Raio	$R = 695\,500 \text{ km} = 109 R_{\text{Terra}}$
Densidade média	$\rho = 1409 \text{ kg/m}^3$
Densidade central	$\rho_c = 160\,000 \text{ kg/m}^3$
Distância em relação à Terra	$1 \text{ UA} = 149\,600\,000 \text{ km}$
Luminosidade	$L = 3,9 \times 10^{26} \text{ watts} = 3,9 \times 10^{33} \text{ ergs/s}$
Temperatura efetiva	$T_{\text{ef}} = 5785 \text{ K}$
Temperatura central	$T_c = 15\,000\,000 \text{ K}$
Composição química principal (Nº)	Hidrogênio = 91,2 %
	Hélio = 8,7%
	Oxigênio = 0,078 %
	Carbono = 0,043 %
Período rotacional no equador	25,67 d
na latitude 75°	33,40 d

Fonte: adaptado de OLIVEIRA FILHO; SARAIVA, 2014.

O Sol está situado aproximadamente a 149,6 milhões de km da Terra, o que o torna a estrela mais próxima do nosso planeta. Ressaltam-se, ainda, os importantes efeitos do Sol na Terra, como aquecimento e iluminação, fundamentais para a manutenção da vida.

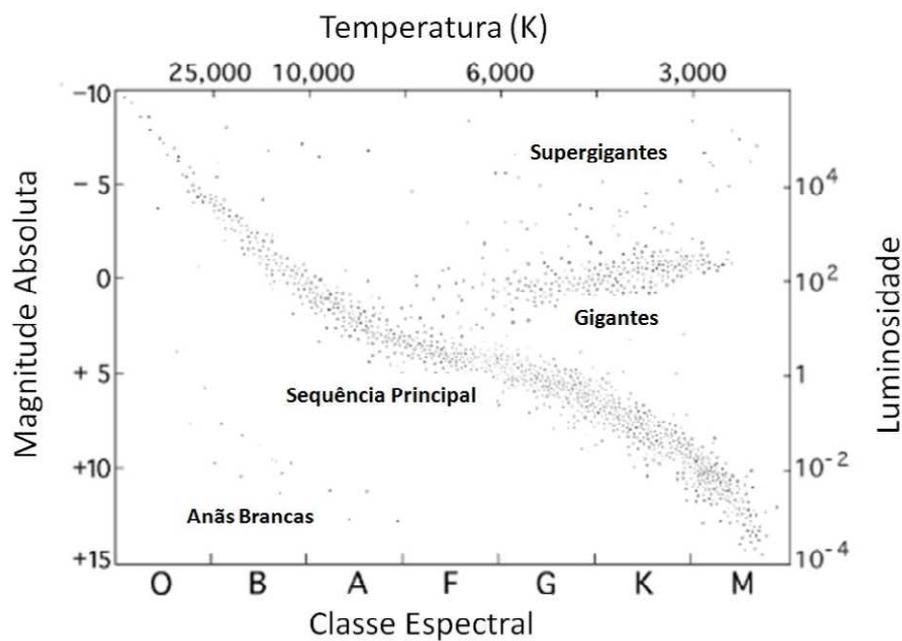
O Sol é a principal fonte de energia da Terra, energia essa que é captada e aproveitada para diversos processos naturais indispensáveis à manutenção da Biosfera.

A fonte básica da energia do Sol são os processos de fusão nuclear. Nesses processos, quatro átomos de Hidrogênio têm seus núcleos fundidos, formando um núcleo mais pesado de Hélio; porém, com massa inferior à soma das massas dos núcleos envolvidos na fusão. A massa restante desse processo é convertida em energia, conforme a lei da equivalência de massa e energia proposta por Albert Einstein.

Esse processo de fusão nuclear só é possível devido à elevada temperatura do núcleo do Sol, que proporciona a energia cinética necessária para os átomos de Hidrogênio superarem a força de repulsão entre eles.

Em relação a outros astros, o Sol é classificado como uma estrela da sequência principal do tipo G2 no diagrama de HR (Hertzsprung-Russel), que indica a relação entre a luminosidade de uma estrela e a sua temperatura efetiva, classificando as estrelas em função de suas cores, que variam do azul ao vermelho, nas classes O, B, A, F, G, K, M, bem como em níveis de luminosidade 1, 2 e 3, conforme exibido na Figura 3.2.

Figura 3.2 Diagrama de Hertzsprung-Russel

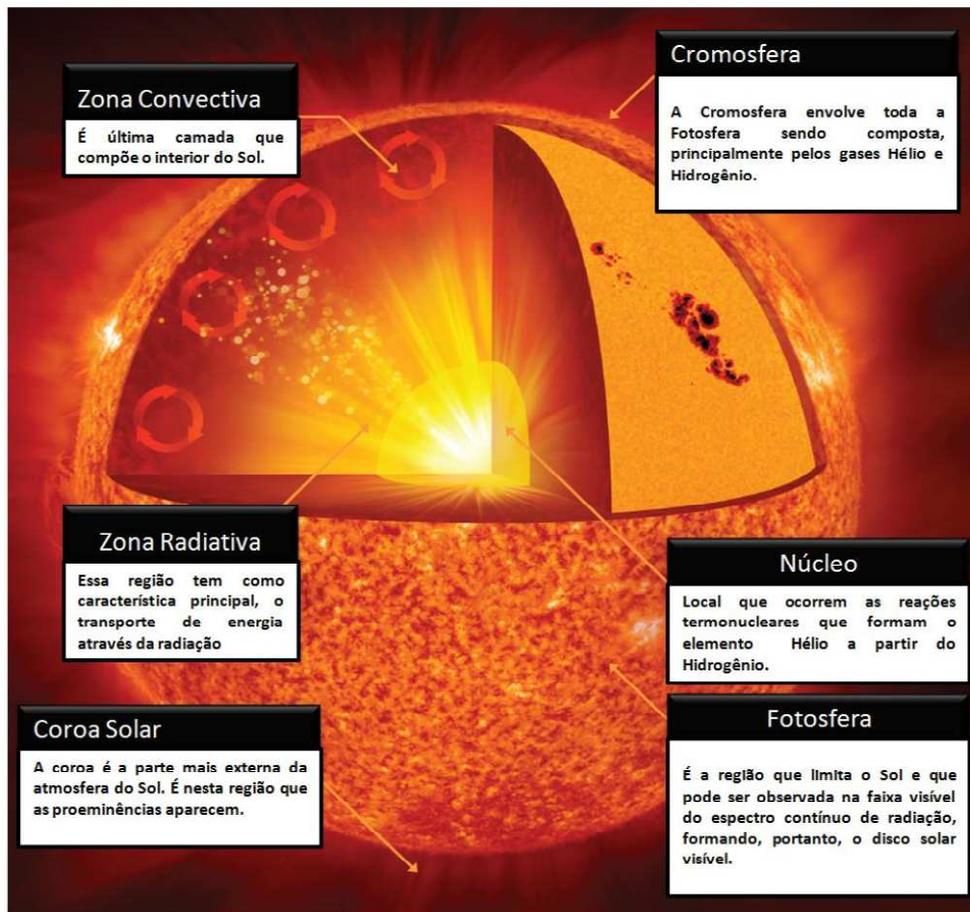


Fonte: NASA
http://imagine.gsfc.nasa.gov/educators/lifecycles/Image31_med.gif

3.1.2 Estrutura do Sol

Quanto à estrutura, o Sol pode ser subdividido em duas regiões: interior, que é constituída pelo núcleo, zona radiativa e a zona convectiva; e Atmosfera Solar, constituída pela Fotosfera, Cromosfera e a Coroa Solar, conforme ilustrado na Figura 3.3.

Figura 3.3- Estrutura do Sol



Fonte: Adaptado da NASA

https://www.nasa.gov/sites/default/files/images/655928main_solar-anatomy-MOS-orig_full.jpg

3.1.3 O interior do Sol

Em seu interior, o Sol pode ser considerado como uma esfera de plasma, comprimida pela ação da própria gravidade e em estado ionizado devido à sua elevada temperatura.

A primeira região do Sol é o núcleo, onde ocorrem as reações termonucleares que formam o elemento químico Hélio a partir do Hidrogênio. Esse processo só ocorre porque o núcleo solar tem densidade elevada e encontra-se em forma de plasma, submetido a altas temperaturas e pressões.

Na região exterior ao núcleo, encontra-se a zona radiativa, que tem como característica principal o transporte de energia por meio de radiação. Assim, toda energia excedente da fusão do Hidrogênio no núcleo é transportada por radiação através desta região.

O transporte de energia citado é feito por meio dos fótons emitidos na formação do gás Hélio. Os fótons são partículas que se movem à velocidade da luz e que têm uma energia proporcional à sua frequência, dada pela Equação 3.1, desenvolvida por Max Plank.

$$E = h\nu \quad 3.1$$

Sendo:

- E Energia do fóton ;
- h* Constante de Planck ;
- ν Frequência da radiação.

A zona radiativa é uma região de alta densidade, possibilitando, dessa forma, uma alta taxa de colisões entre os fótons e os elétrons livres, que os absorvem e emitem os fótons em direções aleatórias. Em decorrência desse processo, uma parte dos fótons tende a voltar ao núcleo e outra parte forma o fluxo para a camada seguinte, caracterizando, assim, a zona radiativa como uma região de resistência ao fluxo de fótons que passa por ela.

A zona convectiva é a última camada que compõe o interior do Sol, vindo após a zona radiativa, com temperaturas bem menores. Esse fator favorece a reconfiguração dos átomos de Hidrogênio e de seus ânions, absorvendo, assim, os fótons advindos da zona radiativa e tornando-se um obstáculo à saída dessas partículas do interior do Sol.

A região de fronteira entre a zona convectiva e radiativa tem a temperatura bastante elevada devido à grande quantidade de energia que vai se acumulando e aquecendo a matéria. Desta forma, surge um fluxo convectivo, que se eleva até a superfície, onde a temperatura e a densidade são menores, fazendo com que a matéria, após irradiar a sua energia, esfrie e fique mais densa, retornando, assim, para a região inferior, completando o fluxo convectivo.

Todo esse processo descrito é muito lento. Isto porque, desde a energia emitida no interior do Sol, por meio das reações nucleares, até a chegada à superfície da estrela, podem-se levar milhões de anos, quando tudo se conclui.

3.1.4 A Atmosfera Solar

Além do seu interior, já descrito, o Sol tem a sua Atmosfera composta por três camadas: Fotosfera, Cromosfera e Coroa Solar.

A Fotosfera é a região que delimita o interior do Sol e que pode ser observada na faixa visível do espectro de radiação, formando o disco solar visível. Trata-se de uma camada estreita, com aproximadamente 500 km de espessura e comporta-se como um corpo negro na temperatura de 6400 K (HARGREAVES, 1992).

Na Fotosfera, existem estruturas denominadas de granulação, conforme exibido na Figura 3.4. Originados a partir do movimento de convecção de matéria solar, os grânulos, Segundo Alrock et al. (1985), têm diâmetro de aproximadamente 1000 km e duração aproximada de 8 min.

Figura 3.4- Imagem da Fotosfera do Sol.

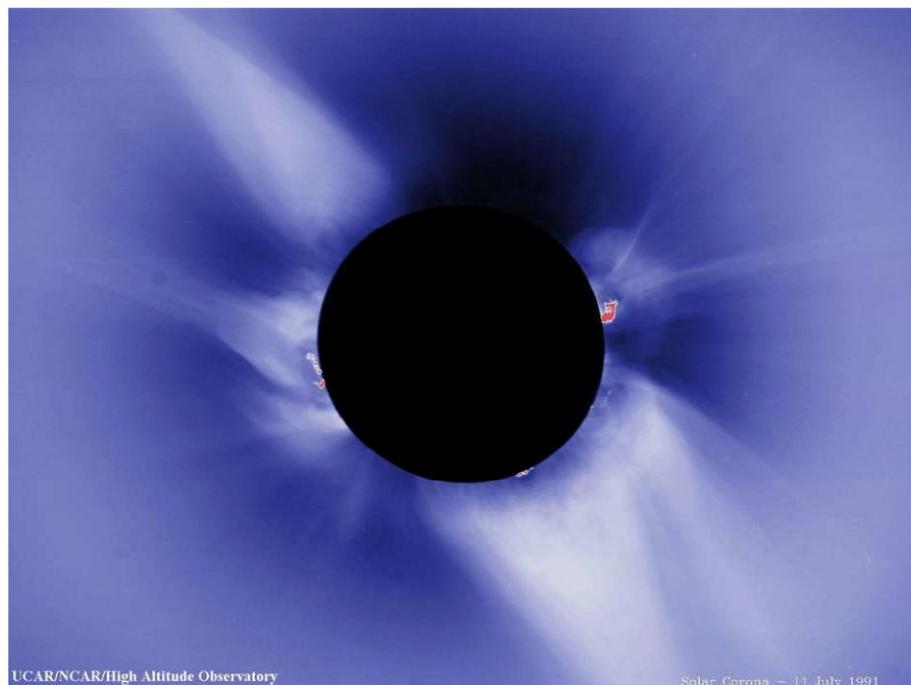


Fonte: NASA

https://www.nasa.gov/sites/default/files/thumbnails/image/prom_combo_oct15.jpg

A Segunda camada da Atmosfera solar é a Cromosfera, conforme mostrada na Figura 3.5. Ela envolve toda a Fotosfera e se compõe, principalmente, por vapores de gás Hélio e Hidrogênio. Nessa região, observam-se fenômenos ligados à atividade solar como as explosões solares. A Cromosfera tem espessura de aproximadamente 2500 km com a temperatura de aproximadamente 50.000 K (HARGREAVES, 1992). A Cromosfera, por ter a radiação bem inferior à da Fotosfera, geralmente não pode ser observada a não ser no momento do eclipse total, quando a Lua encobre o Disco da Fotosfera, proporcionando a observação da Cromosfera.

Figura 3.5- Imagem da Cromosfera do Sol.



Fonte:NASA
<http://solarscience.msfc.nasa.gov/chromos.shtml>

A última e mais externa camada da Atmosfera do Sol é a Coroa Solar, caracterizada por baixa densidade e extensão muito elevada, o que a possibilita alcançar vários raios solares. É constituída basicamente de um plasma, formado de prótons e elétrons livres e átomos de ferro. Sua temperatura é bastante elevada, chegando aproximadamente a $1,5 \times 10^6$ K. De maneira análoga à Cromosfera, essa camada pode ser melhor observada durante um eclipse, visto que, geralmente, fica oculta por conta do brilho da Fotosfera.

3.2 Atividade Solar

3.2.1 Mancha Solar

A atividade solar tem como um dos seus principais indicadores a quantidade de Manchas Solares, que são áreas vistas como manchas escuras comparadas com os seus arredores na Fotosfera e que correspondem às regiões de campos magnéticos transientes intensos e irregulares (JOSELYN, 1998). As manchas podem ser observadas na faixa de radiação visível na superfície do Sol e surgem normalmente em grupos.

O campo magnético irregular e de alta intensidade existente na região das manchas solares origina-se pela rotação diferencial do Sol, o qual tem diferentes velocidades de rotação para os polos e para o equador.

Este campo intenso existente nas manchas solares inibe o transporte de plasma para esta região. Tal fenômeno faz com que a temperatura na mancha seja menor do que a temperatura da região do seu entorno na Fotosfera, gerando, desta forma, o efeito luminoso percebido, onde a região da mancha se torna mais escura.

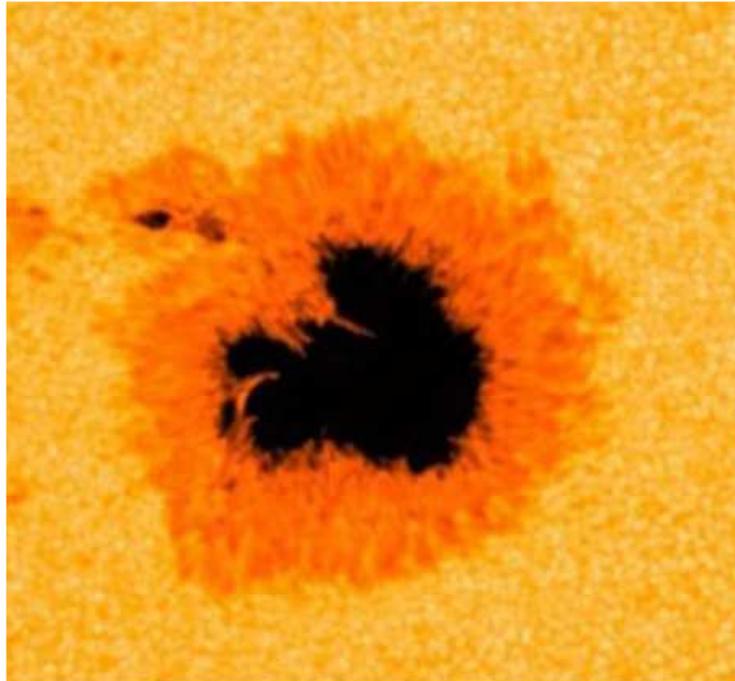
A quantidade de manchas varia periodicamente, caracterizando o Ciclo Solar. No início do ciclo, as manchas surgem em médias latitudes solares, mas, com o tempo, elas passam a surgir próximas ao equador, em regiões compreendidas entre as latitudes solares de 5° a 30° (HARGREAVES, 1992).

A estrutura da mancha, conforme exibida na Figura 3.6, pode comportar uma zona central escura, denominada de umbra e um contorno mais claro, chamado de penumbra, e possuem um tempo de vida de até 100 dias.

3.2.2 Ciclo Solar

O número de manchas solares está intimamente ligado ao ciclo solar, pois elas evidenciam a atividade do Sol. Mesmo já havendo estudos sobre as manchas, apenas a partir de Heinrich Schawabe (1789-1875), houve um relevante interesse sobre o tema, quando se percebeu que havia um ciclo de surgimento e desaparecimento das manchas. O ciclo solar tem duração aproximada de 11 anos, sendo a fase ascendente desse ciclo menor do que a fase descendente. Nesse período, que envolve um ciclo solar completo, há uma inversão dos polos magnéticos do Sol.

Figura 3.6 - Mancha Solar, imagem captada em 07/01/2014



Fonte:NASA
<https://www.nasa.gov/content/goddard/giant-january-sunspots/>

3.3 Eventos Solares

Entre os eventos solares mais importantes, encontra-se o vento solar, que é o fluxo de plasma, com velocidade entre 200 km/s a 800 km/s, constituído de partículas com energia superior a 25 eV (HARGREAVES, 1992), que emergem do Sol para o espaço.

Ao passar pela Terra, o vento solar produz fortes ondas de choques na Magnetosfera terrestre. Os principais efeitos do vento solar sobre a Terra são as distorções permanentes nas linhas do campo geomagnético, bem como a formação da Magnetopausa, que ocorre quando o vento solar interage com a Magnetosfera, impelindo-a na direção oposta ao Sol, formando a cauda característica .

Outro fenômeno relacionado ao Sol é a grande explosão de plasma saída do Sol em alta velocidade, denominada de Ejeção de Massa Coronal, do inglês *coronal mass ejection*. Trata-se da ejeção de matéria solar com liberação de grande quantidade de energia, evento, geralmente, associado às explosões solares, mas que também ocorre sem elas (JOSELYN, 1998).

A Magnetosfera da Terra captura e desvia, por meio de suas linhas de campo, grande parte das partículas e núcleos atômicos de elementos eletricamente carregados que chegam até ela, impedindo que grande parte destas partículas penetre na Atmosfera e atinja a superfície do planeta. Mesmo com a proteção descrita anteriormente, a Ejeção de Massa Coronal muito intensa pode causar prejuízo nas telecomunicações e também nos satélites em órbita.

3.3.1 Explosões Solares

Entre os eventos solares, destaca-se a explosão solar que, em termos de liberação de energia, é o maior evento transiente observado no Sistema Solar, podendo ter, simultaneamente, manifestações electromagnéticas e ainda ejeção de partículas. As explosões são classificadas de acordo com os picos de fluxo de energia liberado, nas classes descritas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Classificação das faixas de emissão das explosões solares

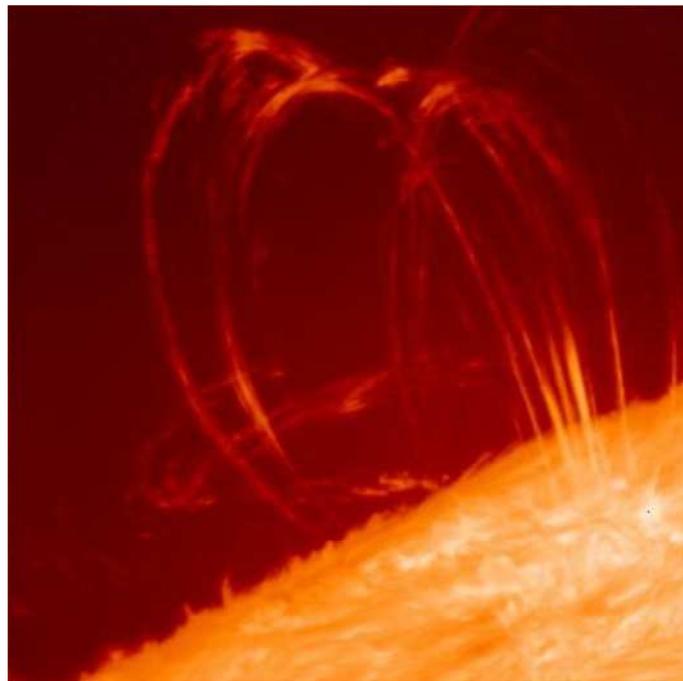
Tipo de Explosão	Faixas de Emissão (W/m²)
A	$< 10^{-7}$
B	10^{-7} a 10^{-6}
C	10^{-6} a 10^{-5}
M	10^{-5} a 10^{-4}
X	$> 10^{-4}$

Fonte: NOAA

Distinguem-se três fases de uma explosão solar. A fase inicial, denominada de precursora e desencadeadora do início do processo com emissão de raios X; a fase impulsiva, onde se formam os arcos característicos e o pico na emissão de raios X; e a fase final, denominada de declínio, na qual, gradualmente, todas as emissões vão diminuindo até a extinção completa do evento.

As explosões ocorrem nas regiões ativas do Sol e perto das manchas solares e, por conta do forte campo magnético, confinam a energia que está sendo emitida do interior do Sol, formando uma estrutura que lembra arcos, conforme mostrado na Figura 3.7. A duração deste evento pode variar de alguns segundos até horas e, no período de máxima atividade do ciclo solar, podem ocorrer mais de dez eventos ao dia (RUST, 1998).

Figura 3.7- Imagem de uma Explosão Solar em 26/jun/1992



Fonte:NASA

http://solarscience.msfc.nasa.gov/images/Loop_line_center.jpg

Com a aniquilação das linhas de campo magnético devido à rotação diferencial do Sol, libera-se uma importante quantidade de radiação que abrange uma larga faixa do espectro eletromagnético, além da ejeção para o espaço de partículas com grande quantidade de energia.

Essas partículas promovem um aumento no brilho da região do Sol em que ocorre a explosão, sendo um dos principais fatores das tempestades magnéticas, nas quais as partículas são lançadas no espaço, colidindo, entre outros, com satélites, naves e planetas, expondo-os a altos níveis de radiação.

As explosões solares são eruptivas quando irrompem para o exterior uma ejeção de massa coronal, constituída basicamente de um plasma, formado de prótons e elétrons livres e átomos de ferro. Além das Explosões Eruptivas, existem as que são confinadas em arcos que emergem e retornam para a superfície solar, sendo a duração da Explosão Confinada bem menor do que a eruptiva (RUST, 1998).

A Fluência é um parâmetro que permite diferenciar as explosões solares, sendo definida como a quantidade absorvida do fluxo de raios X na baixa Ionosfera durante o evento solar. Dependendo da intensidade deste fluxo, pode haver alterações na condutividade da camada inferior ionosférica, que promovem alterações perceptíveis em ondas eletromagnéticas de frequências muito baixas.

3.4 Ionosfera terrestre

Exposta a estes grandes eventos solares, está a Ionosfera, que situa-se entre 60 km e 1000 km e caracteriza-se pela existência de íons livres em quantidade suficiente para afetar a propagação de ondas de rádio (DAVIES, 1965).

Existem dois processos principais que promovem a ionização da Ionosfera. O primeiro é a fotoionização, processo de absorção de radiação por constituintes neutros e que será descrito na seção 3.5. Esta radiação são fótons originados do Sol e que são absorvidos pelos componentes atmosféricos, ionizando o meio. Grande parte da energia que ioniza a Ionosfera diurna é proveniente da absorção da radiação na faixa do extremo ultravioleta. Essa radiação atua mais significativamente nos elementos O, O₂ e N₂, por serem ionizáveis por radiações nesta faixa de frequência.

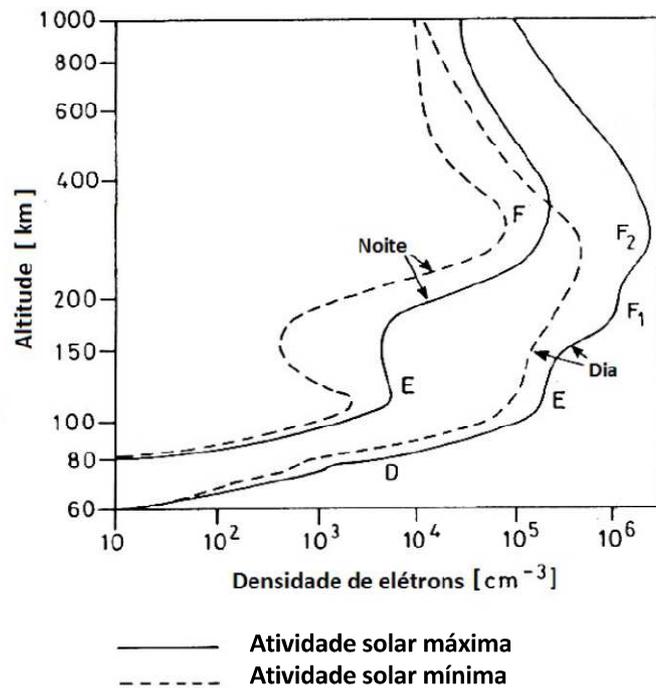
O segundo processo é a ionização por contato, caracterizada pela transferência de energia durante o impacto entre partículas energéticas, provenientes do Sol, de outras galáxias, da Magnetosfera ou da Ionosfera e os constituintes não ionizados da mesma.

A Ionosfera tem algumas regiões que são diferenciadas principalmente pela densidade eletrônica e composição química de cada uma delas, sendo denominadas de regiões D, E e F. O Sol é a maior fonte das radiações que são absorvidas pela Ionosfera (HARGREAVES, 1992) e, durante o dia, promove a existência de todas as regiões citadas, sendo a Região F subdividida em duas, F₁ e F₂.

Durante a noite, a produção de elétrons e íons livres é reduzida consideravelmente, o que promove a extinção da Região D e a junção das regiões F₁ e F₂ em apenas uma, a Região

F. Desta forma, a Ionosfera tem uma redução em sua espessura, conforme indicado na Figura 3.8, que exhibe o perfil da densidade eletrônica ionosférica tanto para o dia como para a noite e em períodos de mínimo e máximo solar.

Figura 3.8 - Perfis da Ionosfera em fases de mínima e máxima atividade solar e em períodos diurno e noturno.



Fonte: Modificado de Hargreaves, 1992.

3.4.1 Estrutura básica da Ionosfera

Com relação à estrutura da Ionosfera exibida na Figura 3.8, a Região D é a porção mais próxima da superfície da Terra, estende-se de 60 km até 90 km e só existe durante o período diurno devido à radiação do Sol (HARGREAVES, 1992). As colisões entre elétrons, íons e partículas neutras são intensas na Região D, devido à alta densidade de elementos neutros desta região.

A Região E estende-se de 90 km até 150 km, está ativa durante o dia e, ao pôr do sol, a sua densidade eletrônica diminui aproximadamente noventa por cento da concentração diurna,

permanecendo assim durante a noite (RICH, 1985). As radiações ionizantes desta região são as linhas espectrais de Lyman- β , que têm comprimento de onda de 102,51 nm, o extremo ultravioleta que tem comprimento de onda variando de 10 nm a 31 nm e os raios X com comprimento de onda entre 1 nm a 10 nm.

A Região F divide-se em duas camadas, F_1 e F_2 , e está localizada a partir dos 150 km de altitude. A densidade eletrônica destas camadas é muito alta durante o dia e diminui consideravelmente durante a noite, quando as duas regiões se fundem formando apenas uma. Segundo Rich (1985), a radiação que age predominantemente nesta Região F é a ultravioleta, por a mesma ter como componente majoritário o Oxigênio molecular, que absorve esse tipo de radiação.

3.5 Região D: formação e composição

A Região D é essencialmente diurna, tem como seus principais constituintes os íons NO^+ , O_2^+ e N_2^+ e situa-se em média entre 60 km e 90 km de altitude com uma densidade de elétrons de 10^2 cm^{-3} a 10^4 cm^{-3} , conforme se percebe na Figura 3.8. A densidade eletrônica desta região depende dos processos de produção e perda de ionização, visto que a radiação solar tem grande influência sobre a taxa de ionização.

A radiação solar Lyman- α (1215 Å) é a principal fonte de ionização da Região D (HARGREAVES, 1992). Ela cria e mantém esta região, uma vez que esta radiação sofre pouca absorção em altitudes maiores, penetrando, assim, até a baixa Ionosfera. A radiação, no extremo ultravioleta, atua com menor repercussão e em comprimentos de onda entre 1027 Å e 1118 Å, ionizando os constituintes minoritários. Já os raios X com comprimentos de ondas de 2Å a 8Å ionizam os demais constituintes. Entre eles, o Oxigênio e o Nitrogênio, em suas formas moleculares.

A Região D apresenta concentração de íons positivos, negativos e elétrons. Durante todo o dia, ocorre também o processo inverso à produção de pares elétrons-íons, que é a perda por recombinação. No decorrer do dia, a radiação solar compensa esta perda, o que não ocorre durante a noite, ocasionando um perceptível decréscimo na densidade de elétrons em todas as regiões da Ionosfera, causando a extinção da Região D, durante o período noturno. Essa relação entre produção e recombinação de elétrons está representada na Equação 3.2, apresentada por Hunsucker e Hargreaves (2003).

$$\frac{\partial N}{\partial t} = q - L - \text{div}(Nv) \quad 3.2$$

Esta expressão representa a variação no tempo da densidade eletrônica, sendo o "q" a taxa de produção de íons; "L" é a taxa de perda por recombinação eletrônica; "Nv" é a taxa de perda relativa ao transporte ou difusão eletrônica e o "v", a velocidade das partículas ionizadas.

Uma produção maior de íons é observada em regiões ionosféricas com altitudes maiores, como a Região F, por ter condições propícias de densidade eletrônica e de penetração dos fótons, uma vez que estes não conseguem penetrar nas regiões mais baixas da Ionosfera, por serem mais facilmente absorvidos em regiões anteriores.

Desta forma, a densidade de elétrons e íons torna-se menor em regiões mais baixas como a Região D, o que dificulta a absorção dos fótons nesta região. Este fato pode ser percebido na Figura 3.8, onde a região com altitude de 300 km possui o maior nível de densidade eletrônica, tanto durante o período diurno quanto no noturno.

Outros fatores são importantes para o processo de ionização, entre eles: etapa do ciclo solar, existência de eventos solares transientes, latitudes das regiões consideradas, ângulo de incidência da radiação solar.

Uma expressão que representa a taxa de produção de íons e elétrons livres é a função de Chapman, descrita na Equação 3.3, desenvolvida em 1931 (HARGREAVES,1992), a qual mostra que a quantidade de íons e elétrons produzida é proporcional a alguns fatores: quantidade de átomos ou moléculas ionizáveis, a seção transversal de absorção dos fótons, a quantidade de radiação disponível e a taxa de eficiência da ionização.

$$q = \eta \sigma n I \quad 3.3$$

Sendo:

- η Taxa de eficiência da ionização: razão entre radiação absorvida e ionização produzida;
- σ Seção transversal de absorção dos fótons;
- n Quantidade de átomos ou moléculas possíveis de serem ionizados;
- I Quantidade de radiação ionizante.

Algumas simplificações foram feitas por Chapman ao propor esta equação, para que se tenha um modelo mais simples e possível de se equacionar:

- ✓ A Atmosfera é composta de um elemento gasoso, verticalmente distribuído com altura de escala constante;
- ✓ A radiação é absorvida proporcionalmente à concentração de partículas de gás;
- ✓ O coeficiente de absorção é constante.

A função de produção de Chapman é usualmente escrita conforme a Equação 3.4.

$$q = q_{m_0} \exp(1 - z - \sec(\chi)e^{-z}) \quad 3.4$$

Sendo:

- q_{m_0} Taxa de produção de ionização na altura h_{m_0} ;
- Z Altura reduzida do gás; $z = (h - h_{m_0}) / H$
- χ Ângulo de Zênite Solar, ângulo entre os raios solares e uma vertical no local;
- H Altura de escala, distância vertical sobre a qual a concentração da Atmosfera varia por um fator exponencial "e" (base dos logaritmos naturais);
Precisa-se também levar em conta o processo de ionização que faz com que, na baixa Ionosfera, a
- h_{m_0} Altura em que a taxa de produção de ionização é maior.

Precisa-se também levar em conta o processo de ionização que faz com que, na baixa Ionosfera, a densidade eletrônica diminua em virtude da recombinação, definida conforme Equação 3.5.

$$L = \alpha N_e N_+ \quad 3.5$$

Sendo:

- α Coeficiente de recombinação;
- N_e Densidade eletrônica;
- N_+ Densidade iônica.

Na Região D da Ionosfera, existe um número significativo de íons negativos, e, como os íons negativos e positivos podem recombinar-se entre si, o balanço entre produção e perda é definido conforme Equação 3.6. (HARGREAVES, 1992).

$$q = \alpha_e N_e N_+ + \alpha_i N_- N_+ \quad 3.6$$

Sendo:

- α_e e α_i Coeficientes de recombinação eletrônica e iônica;
- N_e Densidade eletrônica;
- N_+ Densidade de íons positivos;
- N_- Densidade de íons negativos.

Ao representar a razão entre a densidade dos íons negativos e elétrons por λ , têm-se as Equações 3.7.

$$\begin{aligned} N_- &= \lambda N_e \\ N_+ &= (1 + \lambda) N_e \end{aligned} \quad 3.7$$

Logo:

$$q = (1 + \lambda)(\alpha_e + \lambda\alpha_i) N_e^2 \quad 3.8$$

Quando:

$$\lambda\alpha_i \ll \alpha_e \quad 3.9$$

Obtém-se:

$$q = (1 + \lambda)\alpha_e N_e^2 \quad 3.10$$

Essa Equação 3.10 representa a taxa de íons e elétrons livres, que depende da densidade eletrônica do meio, do coeficiente de recombinação eletrônica e da razão entre a densidade de íons negativos e elétrons.

3.6 Propagação de ondas eletromagnéticas de frequências muito baixas

Como a Região D está na base da Ionosfera durante o dia, uma das técnicas utilizadas para se estudar esta região são as análises das variações de amplitude e fase de ondas de rádio em frequência muito baixa, do inglês *Very Low Frequency* (VLF). A frequência deste tipo de onda está compreendida na faixa de 3 kHz a 30 kHz e se propaga no guia de onda natural formado pela superfície terrestre e a base da Ionosfera.

Algumas características importantes das ondas em VLF é que elas apresentam grande estabilidade e pouca atenuação na propagação em grandes percursos, da ordem de milhares de quilômetros, o que permite uma eficiente coleta de informações da base da Ionosfera.

Deste modo, as ondas de rádio em VLF são utilizadas para o estudo de perturbações ionosféricas que modificam a fronteira do guia de onda, causando alterações repentinas na fase, na amplitude do sinal ou em ambas.

A onda de rádio em VLF, por ser uma onda eletromagnética, tem a sua propagação controlada pelo índice de refração e pela densidade eletrônica do meio, e também pela frequência angular da própria onda. Segundo Davies (1965), Hunsucker e Hargreaves (2003), o índice de refração (η) é expresso pela Equação 3.11 de Appleton, dada por:

$$\eta^2 = 1 - \frac{X}{1 - jZ - \frac{Y_T^2}{2(1 - X - jZ)} \pm \sqrt{\left(\frac{Y_T^4}{4(1 - X - jZ)^2}\right) + Y_L^2}} \quad 3.11$$

Sendo:

$$X = \frac{\omega_N^2}{\omega^2}$$

$$Y = \frac{\omega_B}{\omega}$$

$$Z = \frac{\nu}{\omega}$$

$$\omega_N^2 = \frac{N_e q_e^2}{\epsilon_0 m_e}$$

$$\omega_B = \frac{q_e}{m_e} B$$

$$Y_L = Y \cos \theta$$

$$Y_T = Y \sin \theta$$

Sendo:

- η Índice de refração;
- ω_N Frequência angular de oscilação do plasma;
- B Densidade de Fluxo geomagnético;
- ω_B Frequência angular de giro do elétron na presença de B ;
- ν Taxa de colisão entre elétrons e partículas neutras;
- ω Frequência angular da onda;
- qe Carga elementar do elétron;
- me Massa do elétron;
- ϵ_0 Permissividade no vácuo;
- N_e Densidade de elétrons;
- θ Ângulo entre a direção de propagação da onda e o campo geomagnético.

A onda de rádio em VLF, transmitida na Atmosfera, normalmente, é refratada, e, à medida que adentra na Ionosfera, que é uma região ionizada, o índice de refração do meio tende a diminuir por causa do aumento da densidade de elétrons (N_e). Isto promove a reflexão da onda em direção ao solo.

A altura dentro da Ionosfera em que essa reflexão ocorre depende de alguns fatores, como a frequência da onda transmitida. Desta forma, percebe-se que a Ionosfera permite a transmissão de ondas VLF em grandes distâncias, promovendo, inclusive, reflexões mútuas.

Conforme descreve Filde et al. (1985), os dois modos principais de propagação de ondas no guia Terra-Ionosfera são: o modo transversal magnético (TM), que tem apenas a componente elétrica na direção de propagação da onda; e o modo transversal elétrico (TE), que tem apenas a componente magnética na direção de propagação da onda.

O sinal em VLF fica confinado no guia natural de propagação, composto pela superfície da Terra e pela base da Ionosfera. Este guia pode ser considerado como uma cavidade ressonante, capaz de propagar ondas com determinadas frequências.

3.7 Investigações de perturbações ocasionadas por Explosões Solares na Região D, por meio de ondas de rádio em VLF

Há uma relação entre o sinal VLF refletido na base da Ionosfera e a altura desta região. Sabe-se, também, que variações abruptas da altura da região onde ocorre a reflexão do sinal são ocasionadas por eventos transientes como as explosões solares.

Segundo Singh et al. (2014), em dias pouco perturbado, a altura de referência da Região D varia entre 71 km e 72 km próximo ao meio dia, mas durante uma explosão solar de classe X, essa altura de referência foi aproximadamente de 65 km nos eventos por ele pesquisados. Ressalta o mesmo, que isto ocorreu devido ao aumento do nível de ionização na Região D.

A pesquisa de Todoroki et al. (2007), foi realizada para trajetos menores de 1000 km, percebendo-se também os efeitos das explosões solares nas amplitudes dos sinais em VLF, com ganhos de aproximadamente 8 dB.

Estes eventos solares pesquisados ocasionam um aumento significativo na emissão de raios X e ultravioleta para o meio interplanetário, promovendo um excesso de ionização que ocorre durante a explosão e persiste por um período aproximado entre 10 min e 60 min após o

evento, dependendo da intensidade e duração da explosão solar (CLIVER, 1985).

A interação desse excesso de radiação com a Ionosfera da Terra promove diversos efeitos quando a mesma está iluminada pelo Sol, possibilitando o estudo da reação do plasma ionosférico aos eventos descritos. Uma das mudanças percebidas é o aumento do nível de ionização da Região D, por causa dos raios X absorvidos.

Na pesquisa de Kumar e Kumar (2014), ficou evidenciado também o aumento de nível de ionização da Região D, mesmo no mínimo do ciclo solar, ocasionando um abaixamento na altura de reflexão do sinal em VLF de até 1,2 km.

A condição para que haja esta ionização é que as partículas ou fótons chegados à região tenham um nível de energia superior à energia de ligação do elemento químico presente na região.

Para a Região D, especificamente, como já dito, a principal fonte de ionização é a radiação Lyman- α , que promove a ionização do NO. Já os raios X podem ionizar todos os constituintes presentes na Região D e, de maneira mais intensa, os elementos O₂ e N₂ (HARGREAVES, 1992).

Este fato ocasiona mudanças repentinas na condutividade elétrica da baixa Ionosfera, o que pode causar súbitas anomalias na fase (SPA, *Sudden Phase Anomaly*) ou na amplitude (SFA, *Sudden Field Anomaly*) do sinal em VLF.

4.0 MATERIAIS E MÉTODOS

Inicialmente, foram obtidas as informações sobre explosões solares. Esses eventos são monitorados por sensores de raios X, que medem o fluxo emitido pelo disco solar com uma resolução temporal de um minuto e em duas faixas de energia: 0,5 Å a 4,0 Å e 1,0 Å a 8,0 Å. Os dados da medição dos raios X foram disponibilizados pelo *Solar Data Analysis Center* (SDAC).

Os sensores citados, anteriormente, estão instalados no Sistema de Satélites *Geostationary Operational Environmental Satellite* (GOES), que estão em órbita da Terra a aproximadamente 35.790 km de altitude. Esses satélites são operados pela *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) e também pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), tendo como finalidade principal a previsão do tempo e a realização de pesquisas meteorológicas.

Para auxiliar nas análises das emissões solares de raios X, utilizou-se nesta Pesquisa o SolarSoft, um conjunto de rotinas e base de informações, que contribuiu neste estudo para a análise de dados da física solar em ambiente de programação. O SolarSoft está integrado ao SDAC, o que permite acesso aos dados de emissão de raios X oriundos do Sol, tanto em dias quiescentes, como em dias com explosões solares, possibilitando traçar as curvas de emissão de raios X.

Por meio do SolarSoft, realizou-se a análise das emissões de raios X e a identificação das explosões solares. Isto foi possível porque durante as explosões, a emissão de raios X é significativamente maior do que a emissão em períodos quiescentes, o que torna o evento facilmente perceptível.

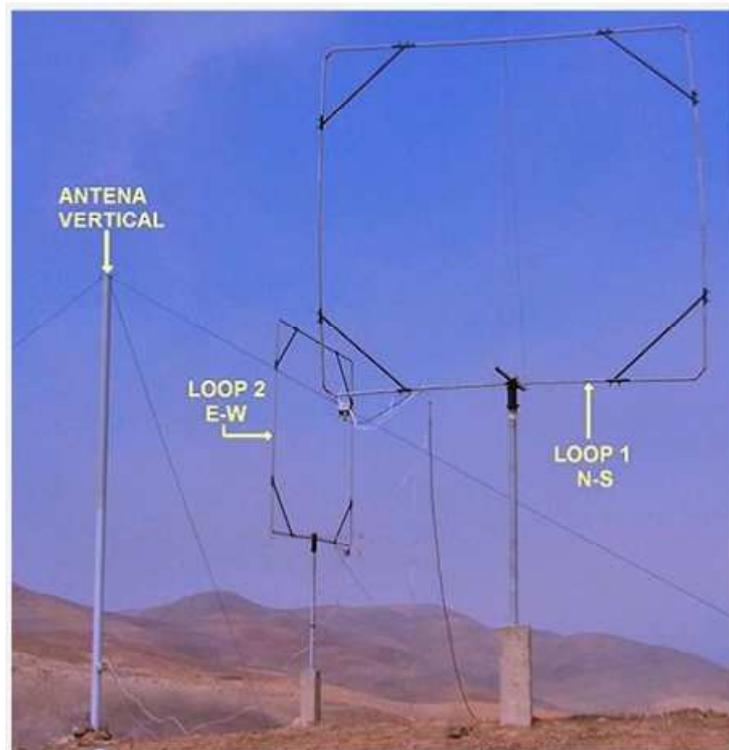
Em seguida, foram utilizados os dados obtidos da Rede *South America VLF Network* (SAVNET), que é constituída por um conjunto de receptores de sinais de rádio na faixa de frequência entre 3 kHz e 30 kHz, instalados em países da América Latina e na Antártica, Rede de colaboração internacional sob a coordenação do Brasil.

Os Receptores da SAVNET captam os sinais de rádio em VLF que são transmitidos a partir de algumas estações instaladas nos Estados Unidos e utiliza as informações com os seguintes objetivos: monitorar a atividade solar, tanto em escalas de tempo de curta, como de longa duração; estudar a Anomalia Magnética do Atlântico Sul e outros fenômenos atmosféricos; e pesquisar fenômenos sísmico-eletromagnéticos (RAULIN et al., 2009).

Como os sinais de rádio em VLF, gerados nas estações transmissoras, são ondas eletromagnéticas, as antenas receptoras para esses sinais devem ser condutores que estão expostos às Ondas, as quais induzem na antena uma corrente elétrica de mesma frequência do sinal, o que possibilita a sua recomposição.

O sistema de recepção, instalado nas Estações da SAVNET, é composto por três antenas: duas sensíveis ao Campo Magnético da onda (antenas em loop quadrado) e uma, sensível ao Campo Elétrico (antena vertical), conforme Figura 4.1.

Figura 4.1 - Antenas da Estação da SAVNET em Punta Lobos, Peru.



Fonte: (CRUZ, 2015)

Após a sua recepção, a Onda de Rádio em VLF passará por um filtro para que sejam retirados possíveis ruídos existentes e por um processo de amplificação que possibilita uma melhor recomposição do sinal. Em seguida, o referido Sinal é digitalizado o que auxilia tanto a sua visualização como a análise de seus parâmetros.

Como o sinal, gerado na estação transmissora, é conhecido, para se identificar as alterações ocorridas é necessário subtrair, do sinal captado, o que foi originalmente transmitido. Tais alterações são oriundas, principalmente, das modificações ocorridas na altura do Guia de Onda Terra-Ionosfera.

As alterações, no Guia de Onda, ocorrem por conta do aumento do nível de ionização da Região D, ocasionado pela emissão de raios X durante uma explosão solar.

Dessa forma, percebe-se que alterações na Região D da Ionosfera interferem diretamente na propagação do sinal em VLF, implicando as mudanças nos parâmetros do sinal. Durante a explosão solar, ocorre um aumento significativo na amplitude, bem como o avanço de fase do sinal em VLF, captado.

Nesta Pesquisa, as alterações estudadas na Ionosfera são as ocasionadas pela emissão de raios X, que ocorre durante uma explosão solar e que pode provocar o rebaixamento da Região D. Isto ocorre devido ao aumento do nível de ionização da região, ocasionado pela absorção dos raios X emitidos durante a explosão solar, causando as alterações, tanto na amplitude como na fase do sinal em VLF.

Os dados de VLF, que foram utilizados, têm uma resolução temporal de um segundo, com informação sobre a amplitude e fase do sinal captado nas estações receptoras. Como as explosões solares, em estudo, duraram todas mais do que quinze minutos, optou-se em utilizar para cada minuto os valores médios para amplitude e fase do sinal em VLF. Tal procedimento possibilitou a correção de algumas medidas ausentes ou discrepantes, identificadas nos dados captados durante o período de observação.

Percebeu-se, portanto, que a nova resolução temporal de uma medida por minuto é suficiente para o estudo pretendido, uma vez que a taxa de amostragem atende ao Teorema da Amostragem de Nyquist. Esse Teorema estabelece que a frequência da amostragem deve ser maior do que o dobro da frequência máxima alcançada pelo evento em estudo.

Os dados dos sinais de rádio em VLF, utilizados nesta Pesquisa, foram obtidos pela Rede SAVNET para os dois trajetos: NAA-ATI e NAA-PLO, inicialmente por um período de um mês, março/2011. Para o trajeto NAA-PLO, houve trinta dias de medições, enquanto para o trajeto NAA-ATI foram sete dias com dados disponíveis. Utilizaram-se, também, os dados referentes a três dias do mês de julho/2012.

Na Figura 4.2 está exibido um exemplo dos dados de ondas em VLF fornecidos pela SAVNET, para o dia 08/03/2011, compostos por dezesseis colunas que são descritas em um cabeçalho acima dos dados.

Figura 4.2 - Apresentação de um exemplo dos dados de ondas em VLF.

DATE-OBS= '2011-03-08' /															
STATION = 'aribaia '															
COL-1 = 'Time-UT (s)' /															
COL-2 = 'GPS Delay (us)'															
COL-3 = 'NAA-V Phase (deg.)' /															
COL-4 = 'NAA-V Amp (dB)'															
COL-5 = 'HWV-V Phase (deg.)' /															
COL-6 = 'HWV-V Amp (dB)'															
COL-7 = 'NDK-V Phase (deg.)' /															
COL-8 = 'NDK-V Amp (dB)'															
COL-9 = 'NNA-L1 Phase (deg.)' /															
COL-10 = 'NNA-L1 Amp (dB)'															
COL-11 = 'NDK-L1 Phase (deg.)' /															
COL-12 = 'NDK-L1 Amp (dB)'															
COL-13 = 'NPM-L2 Phase (deg.)' /															
COL-14 = 'NPM-L2 Amp (dB)'															
COL-15 = 'NLK-L2 Phase (deg.)' /															
COL-16 = 'NLK-L2 Amp (dB)'															
86017.0	0.0200000	789.910	26.2200	-1748.32	25.9900	-601.390	16.2400	836.900	22.3800	-120.590	13.7500	53.6800	21.7800	-473.250	6.59000
86018.0	0.0000000	789.780	25.7600	-1749.85	26.2200	-604.030	15.8300	837.840	21.7500	-116.690	13.1500	53.1400	21.8900	-474.660	4.53000
86019.0	-0.0100000	789.830	25.6700	-1747.09	26.0800	-606.540	14.9100	835.990	21.6100	-119.960	12.4600	53.9200	21.7800	-477.670	4.30000
86020.0	0.0000000	789.060	25.7400	-1745.43	26.2000	-604.270	15.4600	836.050	22.0900	-121.740	13.5300	52.3200	21.6800	-475.920	4.46000
86021.0	-0.1300000	789.140	25.8000	-1743.03	26.3900	-610.170	15.0600	836.820	21.7800	-122.510	11.8600	53.3000	21.7700	-472.650	3.98000
86022.0	0.0200000	788.710	25.6500	-1743.46	25.8100	-610.090	15.6600	838.070	21.5100	-121.740	13.7400	53.2300	21.8400	-475.160	6.71000
86023.0	0.0200000	788.300	25.5800	-1742.89	26.2800	-609.110	15.1400	835.100	21.8500	-127.320	11.8100	53.0700	21.6300	-474.220	5.08000
86024.0	-0.0100000	788.790	25.8900	-1744.64	26.3600	-604.440	15.3900	835.280	21.8100	-123.480	11.8900	53.5000	21.9200	-481.920	3.39000
86025.0	0.0300000	787.820	25.7800	-1743.19	26.3000	-609.320	15.8600	835.490	21.8400	-125.010	12.4200	53.0100	21.8700	-474.590	4.68000
86026.0	0.0300000	788.300	25.8700	-1742.90	26.2300	-609.690	15.4900	835.430	21.9700	-124.320	12.5900	52.4300	21.9600	-475.820	3.10000
86027.0	0.0200000	789.950	25.8100	-1741.76	26.2700	-611.160	15.1900	838.090	22.2100	-125.060	12.1700	53.6800	21.6900	-474.340	4.84000
86028.0	0.0000000	792.190	25.2800	-1744.80	25.4200	-603.580	16.3900	839.200	21.8500	-113.730	15.7000	53.8400	21.8900	-463.550	7.63000
86029.0	0.0300000	790.010	25.7700	-1739.42	25.4700	-608.010	17.3800	838.720	21.8900	-121.250	15.8800	53.2800	21.5000	-473.040	4.77000
86030.0	0.0000000	792.190	25.7300	-1739.71	25.9900	-608.500	16.8200	837.040	22.2500	-123.100	14.9600	53.0500	21.7400	-475.090	5.48000
86031.0	0.0300000	787.340	25.3800	-1742.72	26.1100	-608.810	15.4300	838.630	21.8000	-112.550	12.6500	52.7900	21.6200	-476.790	4.95000
86032.0	-0.0000000	790.710	25.5100	-1740.59	25.8300	-609.000	16.1100	839.870	21.8900	-115.650	13.2400	51.4700	21.5600	-472.080	5.74000
86033.0	-0.0300000	789.140	25.7800	-1740.22	26.0600	-610.610	15.4200	837.630	21.6200	-121.020	12.0900	52.9600	21.7100	-477.230	4.02000
86034.0	-0.0100000	790.270	25.4900	-1742.09	26.1500	-608.120	16.3400	838.200	21.5500	-117.580	12.9700	51.9000	21.7500	-471.390	3.62000
86035.0	-0.0300000	787.900	25.7800	-1741.50	26.2300	-610.910	15.2100	834.370	22.0000	-119.300	11.8300	52.7400	21.7600	-468.010	5.07000
86036.0	0.0200000	788.290	25.7800	-1739.87	26.1100	-607.260	15.6800	834.130	22.1100	-119.700	12.4100	52.0000	21.7000	-474.190	4.20000
86037.0	-0.0100000	789.060	25.6800	-1741.34	25.9600	-606.260	16.2100	835.750	21.9400	-126.350	13.3200	52.0500	21.6900	-479.960	5.17000
86038.0	-0.0000000	788.040	25.6800	-1740.38	26.3700	-604.830	15.7200	835.730	21.8800	-120.760	13.3500	53.9600	21.7200	-481.290	5.06000

Fonte: Autor

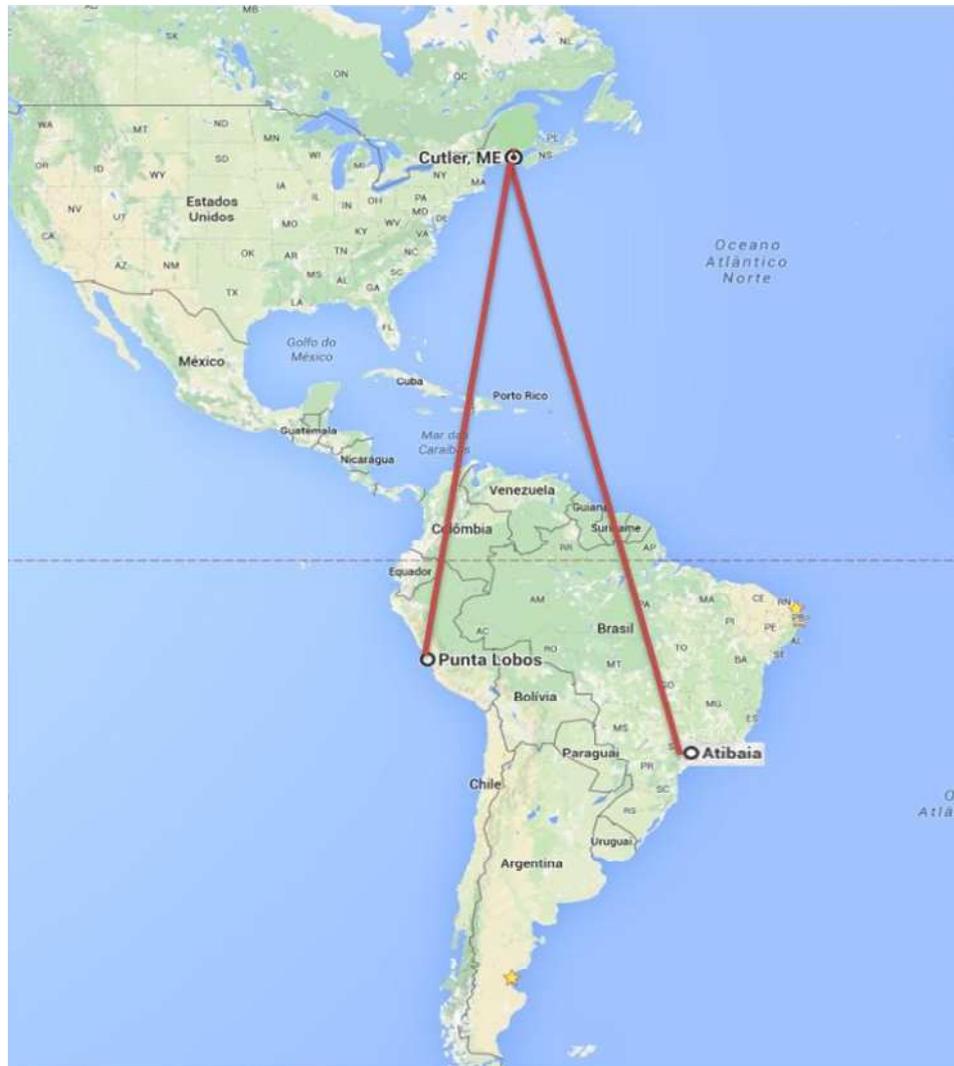
O Transmissor e os dois Receptores, escolhidos para esta Pesquisa, estão localizados geograficamente conforme Tabela 4.1 e são exibidos na Figura 4.3. A escolha dos trajetos foi orientada pela disponibilidade dos dados, bem como a sua disposição geográfica, entre a estação transmissora e as receptoras.

Tabela 4.1- Localização geográfica das Estações utilizadas

Tipo	Identificação	Coordenadas (°)	
Transmissora	NAA - Cutler	44,638N	67,277W
Receptora	PLO - Punta Lobos	12,500S	76,800W
Receptora	ATI - Atibaia	23,185S	46,558W

Fonte: Autor.

Figura 4.3 - Receptores de sinais em VLF instalados em Atibaia (ATI) e Punta Lobos (PLO) e Transmissor de Sinais em VLF instalado em Cutler (NAA) e Trajetos NAA-PLO e NAA-ATI



Fonte: Autor.

Os trajetos são caracterizados por possuírem maiores componentes Norte-Sul, uma vez que, segundo Cruz (2015), as alterações nos sinais VLF promovidas por distúrbios ionosféricos dependem do trajeto de propagação da onda. Na Tabela 4.2, estão exibidos as extensões de cada trajeto.

Tabela 4.2- Extensões dos trajetos escolhidos

Percorso	Extensão (Mm)
NAA/PLO	7,87
NAA/ATI	6,46

Fonte: Autor.

Foram escolhidos os trajetos mais paralelos à linha de avanço dos raios solares na superfície terrestre, para aumentar a probabilidade de se ter os trajetos totalmente iluminados durante as explosões solares.

Se o trajeto estiver, apenas, parcialmente iluminado pela luz do Sol durante uma explosão, o Guia de Onda Terra-Ionosfera terá condições distintas durante o trajeto, o que poderá acarretar alterações nos parâmetros do sinal captado, que seriam sobrepostas aos efeitos da explosão solar.

Para verificar a condição de iluminação dos trajetos entre o transmissor e os receptores, foi utilizado o software GeoClock 9.0. O programa citado indica a condição de iluminação de determinada região, a qualquer hora e dia pretendidos, indicando ainda a posição do Sol e da Lua.

Na Figura 4.4, está exibida uma aplicação do GeoClock 9.0, onde se mostra as condições de iluminação em todo o mundo para o dia 27/04/2016 às 02h41min, GMT -3. Na referida figura, podem-se identificar as regiões iluminadas, as não iluminadas e, ainda, as posições, em destaque, do Sol e da Lua.

Uma vez que o objetivo desta Pesquisa é investigar os efeitos da explosão solar na Região D ionosférica, por meio de ondas em VLF, inicialmente verificou-se durante todo o mês de março/2011, as explosões solares existentes.

Para tanto, foram utilizados os dados de emissão de raios X solares fornecidos pelo SDAC, identificando os picos de emissão, durante o período de análise, que correspondem às explosões solares ocorridas.

Figura 4.4 - Interface do programa GeoClock 9.0, que mostra a parcela iluminada da superfície da Terra para determinado horário do dia, indicando ainda a posição do Sol e da Lua.



Fonte: Autor.

Em seguida, foram obtidas as seguintes informações sobre as explosões solares: o momento em que ocorreu, intensidade e duração. Com o uso do GeoClock 9.0, foi identificada a condição de iluminação do trajeto entre o transmissor e os receptores, para cada explosão.

Após descritos cada um dos itens citados anteriormente, foram identificadas as explosões solares que ocorrerem durante o período em que todo o trajeto estava iluminado, esse foi o conjunto de eventos analisados, bem como as suas repercussões na Região D ionosférica.

Em seguida, foram identificadas as emissões de energia das explosões solares, sabendo que são proporcionais a essas alterações nos sinais em VLF, informações detectadas durante o período em que há iluminação completa dos trajetos escolhidos.

Analisados os sinais de rádio em VLF, que foram captados durante as explosões solares, foi possível identificar, nesses sinais, as alterações tanto na amplitude, representadas por aumentos expressivos em sua magnitude, como avanço na fase do Sinal. Essas alterações são decorrentes do rebaixamento da Região D, por causa do aumento do nível de ionização da mesma.

Com relação ao deslocamento da fase, foi realizada uma análise em mais cinco explosões solares, perfazendo um conjunto de seis eventos transientes, para verificar se haveria correlação entre as repercussões nas fases dos sinais em diferentes explosões e trajetos.

Como os dois trajetos tem dimensões distintas, foi necessário proceder a Normalização das dimensões dos trajetos. Tal procedimento se deu por meio da razão entre o valor do avanço de fase, ocasionado pelas explosões solares, e a distância de cada trajeto.

Dessa forma, foram identificadas as alterações nos sinais em VLF, picos em sua amplitude e avanço de fase, relacionados aos eventos solares transientes e a influência deles no Guia de Onda Terra-Ionosfera. Assim, foi possível identificar a alteração na ionização da Região D.

5.0 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a análise dos dados para identificação das explosões solares ocorridas durante o mês de março/2011, foram verificados os picos nas curvas de emissão de raios X, que são indicativos de explosões solares, um destes eventos está descrito nesta Pesquisa.

A Explosão selecionada, descrita e analisada deveria ter sua magnitude suficiente em termos de emissão de raios X, para que as repercussões nos sinais de VLF fossem perceptíveis, visto que, na pesquisa de Cruz (2015), as explosões solares produzem aumento dos níveis de ionização na Ionosfera, ocasionada por uma variação significativa da condutividade elétrica, quando a fluência era a partir de $2,6 \times 10^{-7} \text{ Jm}^{-2}$.

Necessariamente, a explosão deveria ter ocorrido enquanto os dois trajetos estivessem completamente iluminados, para se perceber a interação do evento com a Região D.

Diante dos requisitos postos e dentro do conjunto de dados disponíveis, o evento selecionado foi uma Explosão Solar ocorrida no dia 08/03/2011, iniciada às 18h 08min UT, tendo, por volta das 18h 28min UT, o momento de maior emissão de raios X e se extinguindo às 18h 41min UT, conforme informações do NOAA.

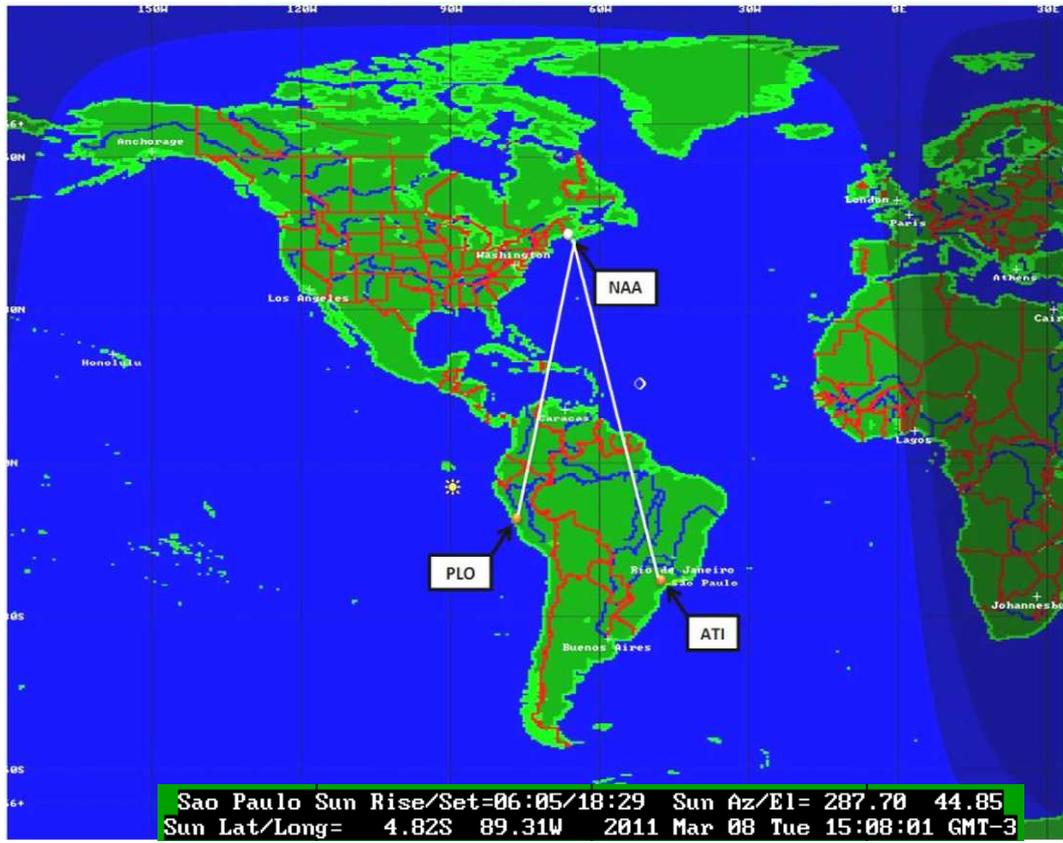
Em Cutler, onde está instalada a Estação Transmissora NAA, o horário local de início do evento foi às 14h08min. Nos locais onde estão instaladas as Estações Receptoras ATI em Atibaia, o horário foi 15h08min, e, em PLO em Punta Lobos, o horário foi 13h08min. Desta forma, os dois trajetos estavam totalmente iluminados, conforme exibido na Figura 5.1, que indica também a posição do Sol, no momento da explosão.

A Explosão Solar detectada foi classificada como M4.4 segundo a Tabela 3.1, por ter tido um pico de emissão de aproximadamente $4,45 \cdot 10^{-5} \text{ W/m}^2$. Os dados referentes à emissão de raios X da explosão foram obtidos no SDAC por meio do SolarSoft, que disponibiliza as medições obtidas pelos sensores instalados no GOES.

As curvas que representam a emissão de raios X em dois canais distintos (o primeiro de 0,5 Å a 4,0 Å e o segundo de 1,0 Å a 8,0 Å) estão exibidas na Figura 5.2. O eixo horizontal representa o horário em UT e, nos eixos verticais, estão exibidas as emissões dos raios X em sua magnitude e as classes das explosões solares, conforme a Tabela 3.1.

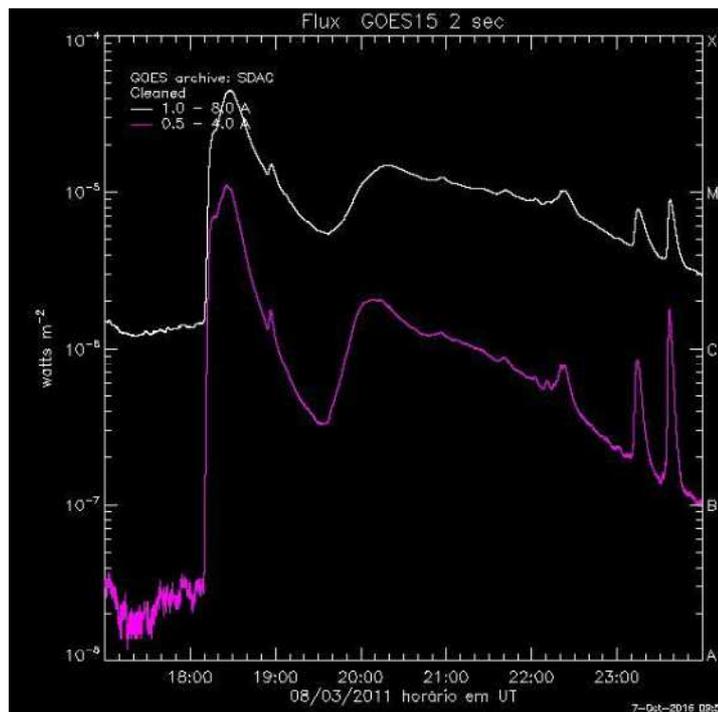
Nas curvas representativas das emissões de raios X nos dois canais, verificou-se que, no período anterior à explosão, há níveis de emissões bem inferiores aos medidos durante a fase eruptiva da explosão solar. Esta fase é caracterizada pelo pico de emissão de raios X, que ocorre após a fase precursora da explosão.

Figura 5.1 - Interface do programa GeoClock 9.0, que exibe a parcela iluminada da superfície da Terra e os trajetos NAA-ATI e NAA-PLO, no momento que inicia a explosão solar.



Fonte: Autor.

Figura 5.2 - Fluxos de raios X em dois canais de emissões distintas, sendo eles: o canal de 0,5Å a 4Å e o canal de 1Å a 8Å.

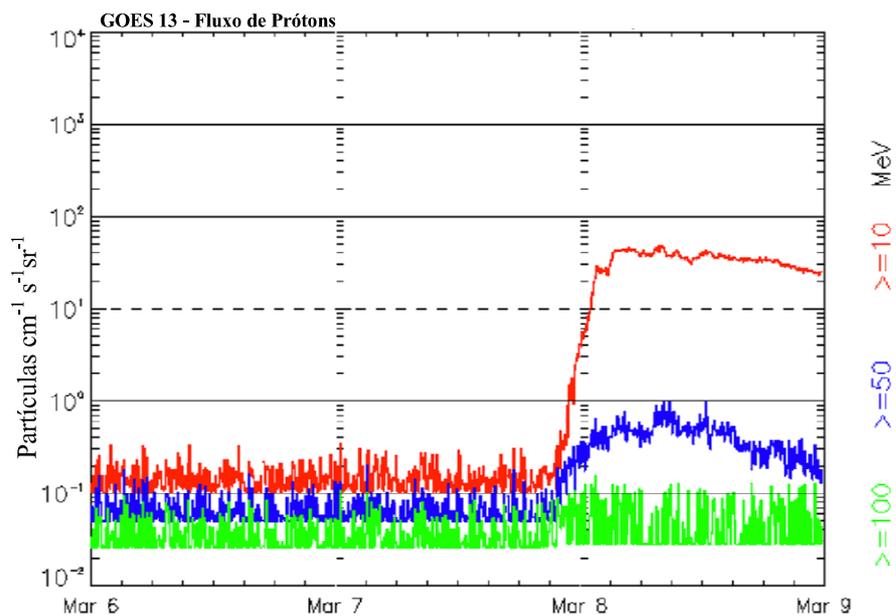


Fonte: SDAC.

Posteriormente à fase eruptiva, segue uma fase de declínio da explosão solar, caracterizada no gráfico pela diminuição e, em seguida, pela extinção das emissões extras de raios X.

Durante o dia em que a Explosão Solar ocorreu, houve também emissão significativa de partículas, conforme exibido na Figura 5.3, que descreve o fluxo dos Prótons em três níveis diferentes de energia, tanto para o dia da explosão como para os dois dias anteriores. O eixo horizontal representa os dias em que foram feitas as medições e, no eixo vertical, estão exibidos os quantitativos de Prótons captados por unidade de área em cada segundo, diferenciando, por meio de cores, os três níveis distintos de energia.

Figura 5.3 - Fluxos de partículas em três níveis de energia, para o período de 6/03/11 a 8/03/11.



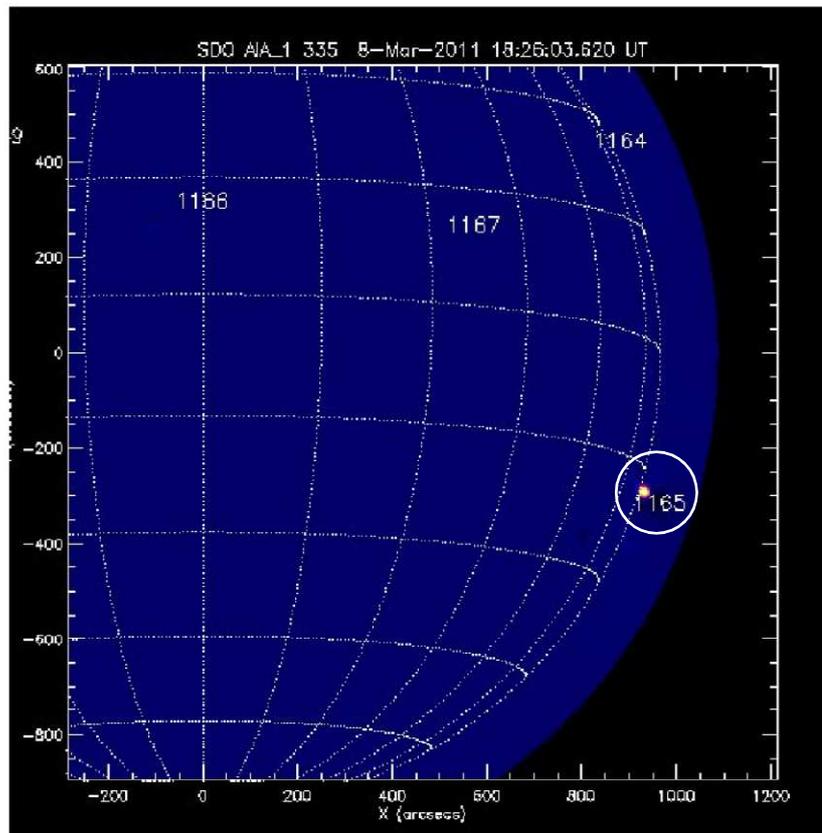
Fonte: NOAA

Percebe-se que, nos três níveis de energia descritos na Figura 5.3, a emissão de Prótons do dia 08/03/2011 é superior à emissão que é registrada nos dois dias anteriores. Isto ocorre, inclusive, para níveis acima de 100 MeV, sendo este o mais significativo entre os três níveis apresentados, por ser o que causa maior repercussão entre eles.

As explosões sempre ocorrem em manchas solares presentes nas regiões ativas do Sol. Para cada nova região ativa que é detectada, o NOAA atribui uma numeração sequencial.

Desta forma, na superfície do Sol, a localização da Explosão pesquisada encontra-se indicada como **1165** na Figura 5.4, que representa a região ativa onde ocorreu o evento.

Figura 5.4 - Regiões Ativas na superfície solar, durante a explosão ocorrida no dia 08/03/2011.

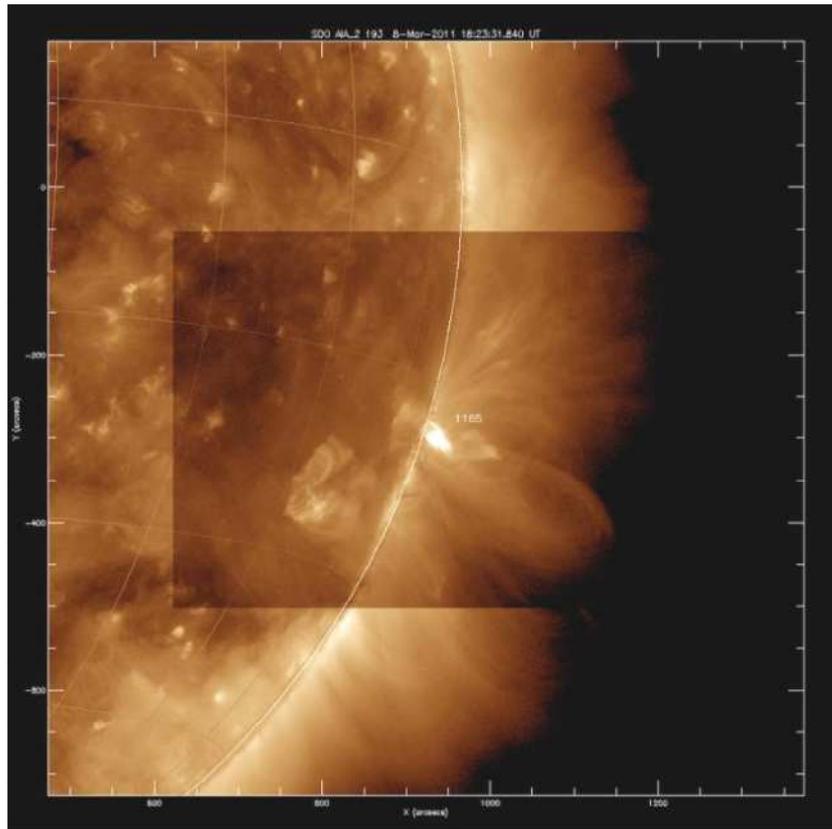


Fonte: SDAC

Já na Figura 5.5, exibe-se a imagem da mesma Explosão Solar em sua fase impulsiva, onde se formam os arcos característicos, momento de maior emissão de raios X, durante todo o evento.

Para verificar a interação que existe entre a explosão solar e o aumento da ionização na Região D, foram utilizados os dados de ondas em VLF nos trajetos citados anteriormente, uma vez que estes sinais se propagam no guia que tem como fronteira a Região D e a superfície da Terra. Desta forma, alterações na altura de referência da Região D repercutirão no sinal captado.

Figura 5.5 - Explosão solar registrada no dia 08/03/2011 às 18h08 UT



Fonte: SDAC

Na Fig. 5.5, é possível perceber, durante a Explosão Solar, um aumento considerável no brilho da região da mancha **1165**. Durante este evento, ocorre grande liberação de raios X, e esta radiação é capaz de penetrar na Ionosfera chegando até a Região D.

Com a emissão de raios X, que é uma radiação fortemente ionizante, ocorre o aumento na taxa de produção de íons na Região D, segundo a Equação 3.3. Esse aumento na quantidade de íons livres na Ionosfera promove, conforme a Equação 3.2, o aumento da densidade eletrônica desta região.

O aumento da densidade eletrônica da Região D produzirá um rebaixamento desta região com a respectiva diminuição da sua altura de referência. Isto ocorre por conta da força de repulsão entre as cargas de mesmos sinais, as quais tendem a se distanciarem.

Este rebaixamento da altura de referência da Região D significa o rebaixamento da fronteira superior do guia de onda, o que repercute na propagação do sinal em VLF no meio, como observado nas curvas representativas tanto da amplitude como da fase do sinal captado, exibidas na Figura 5.6 e na Figura 5.8.

Fazendo uso dos dados em VLF, foram analisadas as curvas da amplitude e fase do sinal durante uma explosão solar, possibilitando, assim, identificar um aumento significativo na amplitude da onda e um avanço na fase do sinal, o que indica que ocorreram alterações importantes no guia de onda.

Essas alterações no sinal em VLF são ocasionadas por variações no índice de refração do meio. Com o aumento da densidade eletrônica durante o evento solar, haverá a diminuição do índice de refração na Região D, conforme a Equação 3.11.

A onda de rádio em VLF, transmitida por meio da Atmosfera, normalmente é refratada à medida que adentra na Ionosfera. Como o índice de refração do meio tende a diminuir por causa do aumento da densidade de elétrons (N_e), isto promoverá uma reflexão da onda de rádio em direção ao solo.

Com a emissão de raios X durante a explosão solar que causa o rebaixamento da Região D, a reflexão da onda em VLF ocorrerá em uma altura menor do que normalmente ocorre, promovendo, assim, ganhos na amplitude e avanço na fase do sinal.

Desta forma, por meio das alterações perceptíveis tanto na amplitude como na fase do sinal em VLF, e, como os mesmos ocorreram durante a explosão solar, verificou-se que houve alteração no comportamento do nível de ionização da região D durante a explosão.

Para que as alterações ocorridas nos parâmetros do sinal em VLF fossem mais perceptíveis, determinou-se um dia médio quiescente tanto para amplitude como para variação de fase. Este dia quiescente é representado pela média das amplitudes e das fases dos sinais captados, em alguns dias de pouca atividade solar e próximos ao dia do evento pesquisado.

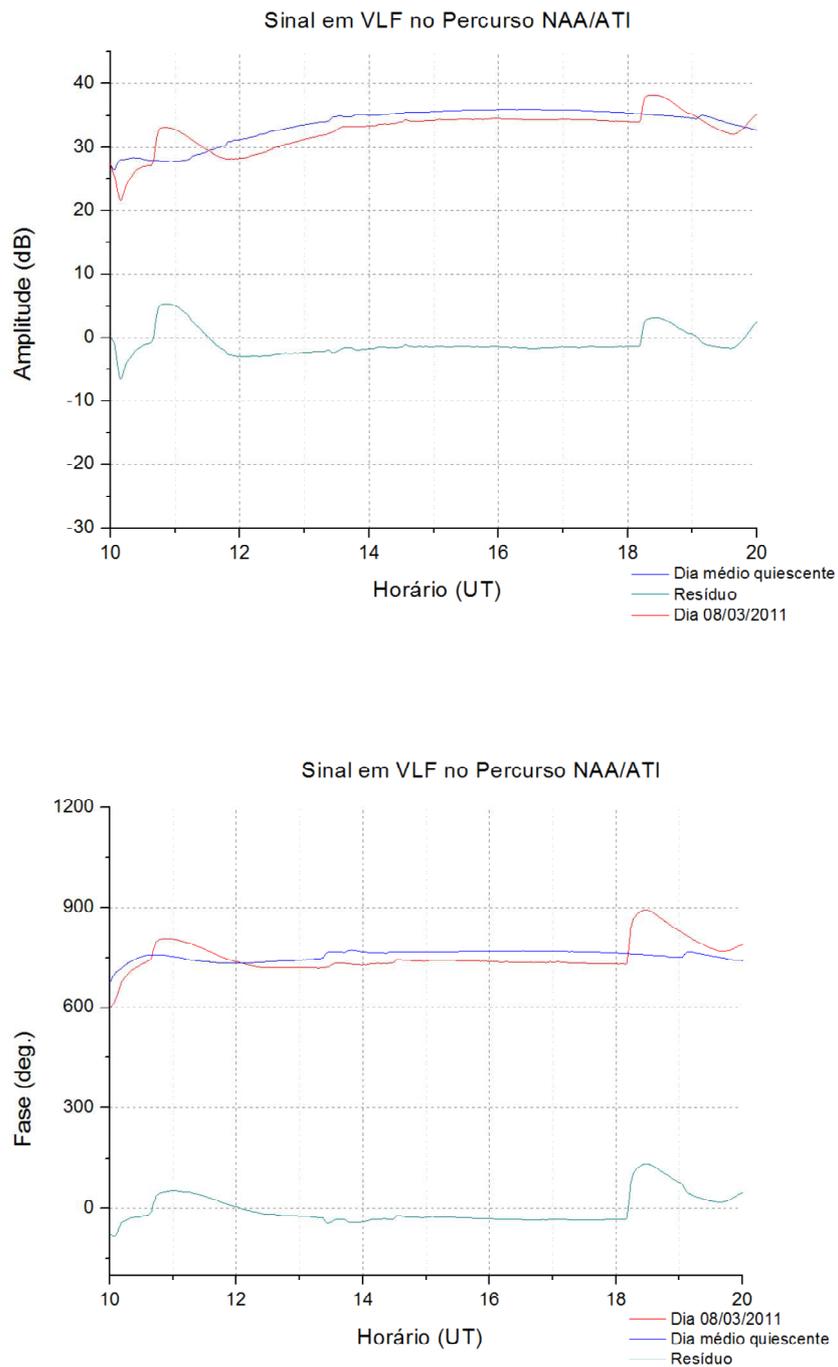
Em seguida, compararam-se as curvas das amplitudes e das fases dos sinais em VLF nas duas situações: o dia médio quiescente e o dia da explosão solar.

Os dias utilizados na composição do dia médio quiescente foram escolhidos conforme alguns critérios: a disponibilidade dos dados, dias em que não houve explosões solares significativas e dias em que não houve descontinuidade nas medições dos sinais. Utilizando os critérios citados, foram escolhidos os dias 10, 11 e 19 para o Receptor em Atibaia e os dias 02, 04, 17, 19 e 20 para o Receptor em Punta Lobos. Todos, portanto, no mesmo mês da Explosão Solar pesquisada: março/2011.

As curvas obtidas para a Estação de Atibaia estão exibidas na Figura 5.6, sendo o gráfico superior a representação da amplitude do sinal VLF no dia da explosão solar, bem como a amplitude do sinal VLF para um dia médio quiescente e ainda o resíduo, que

representa a diferença entre as duas situações anteriores. Nesta mesma figura, o gráfico inferior representa a fase, com as mesmas curvas descritas anteriormente para a amplitude.

Figura 5.6 - Variação da amplitude e fase de sinais de rádio em VLF propagantes no trajeto NAA-ATI, para o dia médio quiescente, para o dia 08/03/2011 e o resíduo entre estes dois dias.



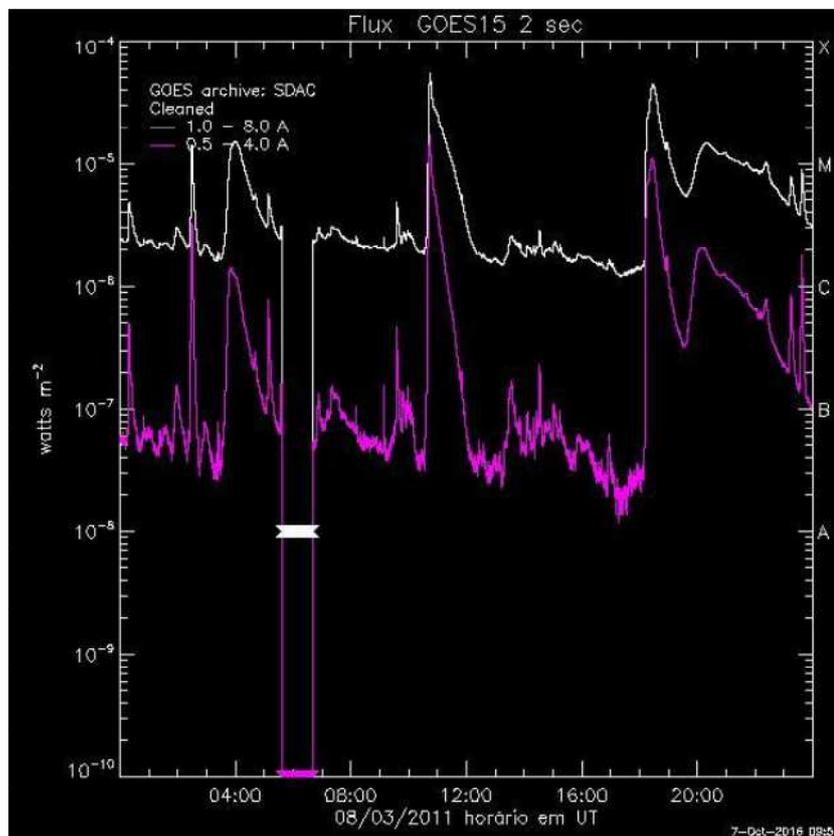
Fonte: Autor.

Com relação à amplitude do sinal em VLF, observa-se, na Figura 5.6, que a curva representativa do dia médio quiescente não tem alterações importantes em sua magnitude, exceto por volta das 10h00 UT, que tem um leve acréscimo, possivelmente ocasionado pela ionização inicial do dia, o que promove um rebaixamento da fronteira do guia de onda.

Verificando a curva que representa as amplitudes do sinal captado no dia da explosão pesquisada, é possível verificar um aumento significativo dos valores de amplitude por volta das 18h 08min UT, permanecendo, assim, durante a explosão solar. Nesta mesma curva, observou-se outra explosão solar, ocorrida por volta das 10h 30min UT. Por causa do horário, esta explosão não teve repercussão no outro trajeto, que ainda não estava iluminado. Esta explosão pode ser observada na Figura 5.7.

Na curva que representa o resíduo, exibida na Figura 5.6, é possível perceber que a mesma está todo tempo deslocada do zero, indicando que as amplitudes medidas no dia da explosão são inferiores às medidas no dia médio quiescente. Isto mostra que, durante o dia da explosão solar, a região D estava com a altura de referência superior com relação aos dias quiescentes, aos quais foram comparados.

Figura 5.7 - Fluxos de raios X em dois canais distintos de emissões, plotados no mesmo eixo, para o dia 8/03/11.



Fonte: SDAC

Na Figura 5.3, observa-se que, no dia da explosão pesquisada, houve uma importante emissão de partículas e, como foi constatado o aumento na altura de referência da Região D, as partículas emitidas são de cargas positivas, conforme se verifica também na figura citada. Esse tipo de partícula aumenta o processo de recombinação na Ionosfera, diminuindo, assim, a densidade de cargas negativas da região, o que promove uma diminuição na sua espessura, aumentando, conseqüentemente, a sua altura de referência.

O aumento na altura de referência da fronteira superior do guia de onda faz com que a reflexão do sinal em VLF ocorra em altitudes maiores. Isto promove uma perda na potência do sinal captado, percebido por meio do decréscimo na curva da amplitude do sinal em VLF.

Finalmente, próximo ao instante da máxima emissão da Explosão Solar, ocorrida às 18h28min UT, observou-se a ocorrência de picos nas curvas representativas, tanto da amplitude como da fase do sinal em VLF.

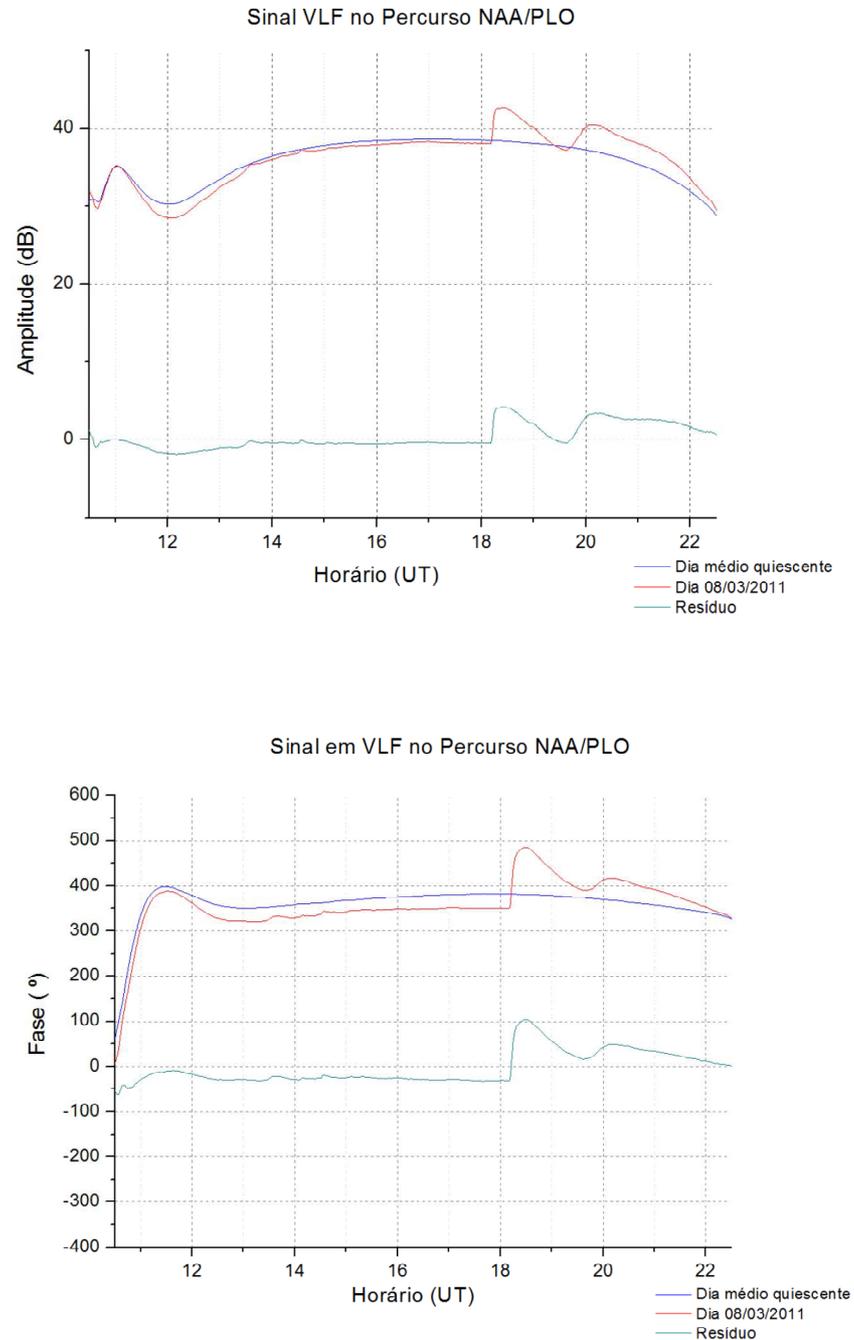
A mesma análise foi realizada com os dados obtidos na Estação Receptora em Punta Lobos, cujos gráficos estão expostos na Figura 5.8. Percebe-se que houve alterações semelhantes às descritas para Estação em Atibaia, tanto na amplitude como na fase do sinal, durante a Explosão Solar.

Conforme Cruz (2015), o aumento na densidade eletrônica na Ionosfera, ocasionada pelas emissões dos raios X durante uma explosão solar, é independente do ângulo de incidência dos fótons solares, sendo isso válido apenas para ângulos menores do que 70° . A mesma Pesquisa afirma que a fluência mínima necessária durante uma explosão solar, para promover um aumento do nível de ionização da Região D, seria de $2,6 \times 10^{-7} \text{Jm}^{-2}$ e que este valor não está comprovadamente relacionado com os períodos de mínima e máxima atividade do Sol.

Já Marques (2008) afirma que a Região D ionosférica é mais sensível a explosões solares durante os períodos de baixa atividade do Sol. Durante a Pesquisa citada, não foi descrita a participação das partículas energéticas, provenientes da emissão de raios X, no aumento da ionização da Região D.

Dando continuidade às análises dos sinais transmitidos em cada trajeto desta Pesquisa, verificou-se, nos dados obtidos durante a Explosão Solar, o valor da maior amplitude média encontrada, e, em seguida, comparou-se tal amplitude com a amplitude média das últimas três horas pré-evento.

Figura 5.8 - Variação da amplitude e fase de sinais de rádio em VLF propagantes no trajeto NAA-PLO, para o dia 08/03/11, para um dia médio quiescente e o resíduo entre estes.



Fonte: Autor.

Esta análise foi realizada para que se destacasse o efeito da explosão solar na amplitude do sinal, os valores encontrados são exibidos na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Medidas do ganho na amplitude do sinal durante uma explosão solar, para dois trajetos.

Percurso	Ganhos Amplitude (dB)	Ganhos Amplitude (%)
NAA/PLO	4,61	12,13%
NAA/ATI	3,93	11,43%

Fonte: Autor

Analisando a variação na amplitude do sinal, o Trajeto NAA-PLO proporcionou um ganho superior do que foi obtido em NAA-ATI. Esse fato ocorreu mesmo sendo menor o primeiro Trajeto.

Espera-se que, quanto maior for um trajeto, maior seja também a fronteira do guia de onda que é susceptível à explosão solar. Desta forma, um evento solar repercutirá mais intensamente na amplitude do sinal do trajeto maior ao se comparar com um sinal transmitido no trajeto menor, nas mesmas condições de iluminação solar.

No caso analisado nesta Pesquisa, constatou-se que a relação entre os ganhos das amplitudes dos sinais não é diretamente proporcional à relação entre os comprimentos dos trajetos.

Segundo Basak (2013), os efeitos da explosão solar nas amplitudes do sinal em VLF são dependentes do ângulo zenital, que relaciona a posição do Sol e o trajeto considerado da onda, o que também ficou caracterizado nesta Pesquisa.

Desta forma, mesmo sendo o Trajeto NAA-PLO o menor entre os dois pesquisados, este ainda teve um ganho maior na amplitude do sinal com relação ao Trajeto NAA-ATI. Isto ocorreu devido à posição do Sol durante a explosão ter possibilitado um melhor ângulo de incidência da emissão de raios X na região onde está o Trajeto NAA-PLO, comparando-se com o outro Trajeto.

Posteriormente, passou-se a verificar se as alterações ocorridas nos sinais captados durante a Explosão Solar do dia 08/03/2011 estariam correlacionadas com as repercussões nos sinais VLF de outras explosões solares, ocorridas nos mesmos trajetos. Para esta análise, além da Explosão já descrita, foram escolhidos mais cinco eventos conforme os critérios já descritos nesta Pesquisa, formando o conjunto exibido na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Informações sobre os conjunto de explosões analisadas

ORDEM	DATA	HORÁRIO UT			SATELITE	CLASSE	REGIÃO
		INICIO	PICO	FIM			
1	08/07/2012	12:54	13:02	13:13	GOES 15	C6.1	1520
2	08/07/2012	14:35	14:43	14:55	GOES 15	C6.7	1515
3	08/07/2012	16:23	16:32	16:42	GOES 15	M6.9	1515
4	12/07/2012	15:37	16:49	17:30	GOES 15	X1.4	1520
5	27/07/2012	17:17	17:26	17:32	GOES 15	M2.7	1532
6	08/03/2011	18:08	18:28	18:41	GOES 15	M4.4	1165

Fonte: NOAA

Na Tabela 5.2, para cada Explosão Solar, estão descritas as seguintes informações: data; horários de início, pico e fim; o satélite que fez as medições; a classe da explosão e a região da mancha solar onde ocorreu o evento. Para cada evento ocorrido, verificou-se que os trajetos entre o transmissor e os receptores estavam totalmente iluminados.

Em seguida, mediu-se o avanço de fase do sinal em graus, para o momento de pico da explosão solar, com relação à fase medida antes da explosão ocorrer, conforme exibido na Tabela 5.3.

Posteriormente, calculou-se a razão dos avanços de fases obtidos pelos comprimentos dos trajetos. Esse procedimento permite normalizar os avanços de fases com relação aos trajetos percorridos, entre transmissor e receptor.

Esses dados estão exibidos na Tabela 5.3, que traz as seguintes informações para cada explosão: data e horários dos eventos; o avanço de fase; a razão entre o avanço de fase e o comprimento do trajeto.

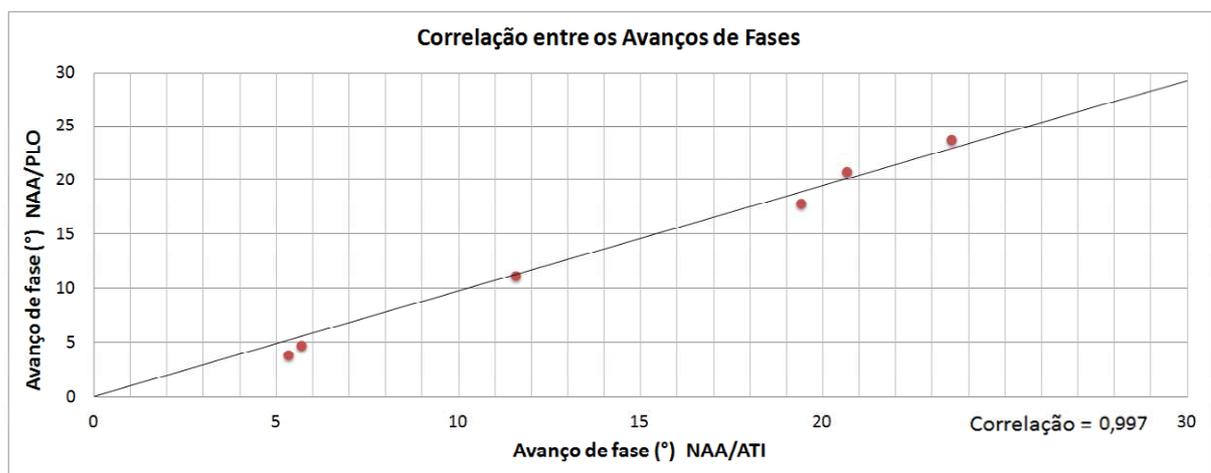
Tabela 5.3 - Descrição do conjunto de explosões analisadas

ORDEM	DATA	HORÁRIO UT			Def. ATI (°)	Def. PLO(°)	ATI $\phi(^{\circ})/Dist.$	PLO $\phi(^{\circ})/Dist.$
		INICIO	PICO	FIM				
1	08/07/2012	12:54	13:02	13:13	44,78	30,44	5,69	4,71
2	08/07/2012	14:35	14:43	14:55	41,84	24,7	5,32	3,82
3	08/07/2012	16:23	16:32	16:42	152,7	115,5	19,40	17,88
4	12/07/2012	15:37	16:49	17:30	185,15	153,47	23,53	23,76
5	27/07/2012	17:17	17:26	17:32	91,06	72,25	11,57	11,18
6	08/03/2011	18:08	18:28	18:41	162,54	134,38	20,65	20,80

Fonte: Autor

As duas últimas colunas da Tabela 5.3 exibem valores que representam o avanço de fase normalizado para os dois trajetos analisados na Pesquisa. Foram plotados esses pontos em um gráfico exibido na Figura 5.9 e calculada a correlação entre eles.

Figura 5.9 - Gráfico da correlação entre os avanços normalizados de fases de seis explosões solares nos dois trajetos distintos.



Fonte: Autor

Sendo o índice de correlação calculado entre os avanços normalizados de fases tão próximas à unidade (Cor. = 0,997), isso demonstra que a observação de eventos solares transientes com emissão de raios X nos dois diferentes trajetos tem repercussões semelhantes e fortemente relacionadas, o que indica a confiabilidade da Técnica e dos dados utilizados.

6.0 CONCLUSÕES

A formação da Região D Ionosférica depende da radiação solar, principalmente, a Lyman- α , por este motivo esta região é diurna. Pode-se afirmar que um evento transiente, como a Explosão Solar, emite radiação em raios X, que são capazes de penetrar até a Região D e aumentar o nível de ionização desta região, promovendo, assim, o seu rebaixamento.

O rebaixamento da Região D ficou caracterizado por meio dos ganhos na amplitude e avanço na fase dos sinais de rádio em VLF, transmitidos a partir de uma Estação em Cutler, Estados Unidos e captados em duas Estações Receptoras na América do Sul, situadas em Atibaia, Brasil e em Punta Lobos, Peru.

As alterações ocorridas nos sinais analisados nesta Pesquisa ocorreram devido a um rebaixamento da Região D, ocasionado pela ionização advinda da emissão de raios X das explosões solares.

Para a Explosão Solar do dia 08/03/11, percebeu-se que os ganhos nas amplitudes dos sinais, relativamente aos seus estados pré-evento, foi menor para o Trajeto entre NAA-ATI do que para o trajeto NAA-PLO. Ressalte-se, ainda, que o Trajeto NAA-ATI é maior do que o Trajeto NAA-PLO. Espera-se que quanto maior for um trajeto, maior será também a fronteira do guia de onda que, por sua vez, é susceptível à explosão solar.

Tal situação ocorreu devido a posição do Sol, durante a referida Explosão, ter possibilitado um melhor ângulo de incidência da emissão de raios X na região onde está o Trajeto NAA-PLO, ao se comparar com o Trajeto NAA-ATI.

Constatou-se também, nesta Pesquisa, um alto índice de correlação entre os avanços de fases dos sinais em VLF, durante as seis Explosões Solares avaliadas em dois trajetos distintos, demonstrando que as alterações de fase nos sinais, em diferentes trajetos, estão fortemente relacionadas, o que evidenciou a eficiência da Técnica utilizada, bem como a confiabilidade dos dados trabalhados.

Após as análises realizadas, foi possível verificar uma relação entre os eventos solares transientes pesquisados e o aumento da ionização da Região D ionosférica, explicitada por meio do seu rebaixamento e consequente alteração no Guia de Onda Terra-Ionosfera.

A ionização na Região D, promovida pela Explosão Solar, ocasionou alterações significativas nas amplitudes e fases dos sinais de rádio em VLF, que foram captados nas Estações Receptoras em Atibaia e Punta Lobos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALTROCK, R. C; DEMASTUS, H. L; EVANS, J.W; KEIL, S. L; NEIDIG, D.F; RADICK, R.R; SIMON, G.W. **Handbook of geophysics and the space environment**. 4° ed. Edited by JURSA, A. S. USA: National Technical Information Service, 1985.

ANDREWS, D.G. **An Introduction to Atmospheric Physics**. 2° ed. São Paulo: Cambridge University Press, 2010.

BASAK, T. **Study of the effects on lower ionosphere due to solar phenomena using very low frequency radio wave propagation**. 2013. Tese (Doutorado em Filosofia e Física) - University of Calcutta - India.

CLIVER, E. W. **Handbook of geophysics and the space environment**. 4° ed. Edited by JURSA, A. S. USA: National Technical Information Service, 1985.

CRUZ, E, L, M. **Contribuição ao estudo de distúrbios ionosféricos utilizando a Técnica de VLF**. 2015. Dissertação (Mestrado em Ciências e Aplicações Geoespaciais) - Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo - SP.

DAVIES, K. **Ionospheric radio propagation**. Washington DC, USA: National Bureau of Standards Monograph 80, U. S Government Printing Office, 1965.

FIELD, E. C; HECKSCHER, J.L; KOSSEY, P.A; LEWIS, E.A. **Handbook of geophysics and the space environment**. 4° ed. Edited by JURSA, A. S. USA: National Technical Information Service, 1985.

HARGREAVES, J. K. **The solar-terrestrial environment**. 1. ed. New York: Cambridge University Press, 1992.

HUNSUCKER, R. D. e HARGREAVES, J. K. **The high-latitude ionosphere and its effects on radio propagation**. 1. ed. New York: Cambridge University Press, 2003.

JOSELYN, J.A. **From the Sun: Auroras, Magnetic Storms, Solar Flares, Cosmic Rays**. 1. ed. Edited by RUST, D; SUESS, T. S; TSURUTANI, B., JOSELYN, J.A. Washington DC: AGU Books Board, 1998.

KUMAR, A; KUMAR, S. Space weather effects on the low latitude D-region ionosphere during solar minimum, **Earth, Planets and Space**, 66:76, 2014.

MARQUES, A. A. P. S. **Dependência das propriedades da Região D ionosférica com o ciclo de atividade solar**. 2008. Dissertação (Mestrado em Geofísica espacial) - INPE, São José dos Campos - SP

MITRA, A. P. **Ionospheric effects of solar flares**. 1. ed. Dordrecht: Reidel Publishing Company, 1974.

OLIVEIRA FILHO, K. S; SARAIVA, M. F. O. **Astronomia e Astrofísica**. 3° ed. São Paulo: LF Editorial, 2014.

RAULIN, J. P; DAVID, P. C. M; HADANO, R; SARAIVA, A. C. V; CORREIA, E; KAUFMANN, P. The south America VLF NETwork (SAVNET):Development, installation status, first results, **Geofísica Internacional**, 48 (3), 253-261, 2009.

RAULIN, J. P; BERTONI, F. C. P; GAVILÁN, H. R; GUEVARA-DAY, W; RODRIGUEZ, R; FERNANDEZ, G; CORREIA, E; KAUFMANN, P; PACINI, A; STEKEL, T. R. C; LIMA, W. L. C; SCHUCH, N. J; FAGUNDES, P. R; HADANO, R. Solar flare detection sensitivity using the South America VLF Network (SAVNET), **Journal of Geophysical Research**, vol. 115, a07301, 2010.

RICH, F. J. **Handbook of geophysics and the space environment**. 4° ed. Edited by JURSA, A. S. USA: National Technical Information Service, 1985.

RUST, D. **From the Sun:Auroras, Magnetic Storms,Solar Flares, Cosmic Rays**. 1. ed. Edited by RUST, D; SUESS, T. S; TSURUTANI, B., JOSELYN, J.A. Washington DC: AGU Books Board, 1998.

SINGH, AS. K; SINGH, A. K; SINGH, R; SINGH, R. P. Solar flare induced D-region ionospheric perturbations evaluated from VLF measurements, **Astrophys Space Sci**, Vol. 350, Pg. 1–9, 2014.

TODOROKI, Y; MAEKAWA, S; YAMAUCHI, T; HORIE, T; HAYAKAWA, M. Solar flare induced D region perturbation in the ionosphere, as revealed from a short-distance VLF propagation path, **Geophysical Research Letters**, Vol. 34, L03103, 2007.