

*Universidade de Taubaté*

**Rafael Lima dos Santos**

**Thainá de Oliveira Bertolotto**

**ESTUDO DA ESTRUTURA DA DIGISSONDA E INTERPRETAÇÃO DE SEUS  
DADOS RELACIONADOS AO COMPORTAMENTO IONOSFÉRICO**

**Taubaté**

**2019**

*Universidade de Taubaté*

Rafael Lima dos Santos

Thainá de Oliveira Bertolotto

**ESTUDO DA ESTRUTURA DA DIGISSONDA E INTERPRETAÇÃO DE SEUS  
DADOS RELACIONADOS AO COMPORTAMENTO IONOSFÉRICO**

Trabalho de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade de Taubaté, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Rubens Castilho Júnior

**Taubaté**

**2019**

**SIBi – Sistema Integrado de Bibliotecas / UNITAU**

B546e Bertolotto, Thainá De Oliveira  
Estudo da estrutura da digissonda e interpretação de seus dados  
relacionados ao comportamento ionosférico / Thainá De Oliveira Bertolotto;  
Rafael Lima dos Santos. -- 2019.  
51 f. : il.

Monografia (graduação) – Universidade de Taubaté, Departamento de  
Engenharia Mecânica e Elétrica, 2019.

Orientação: Prof. Me. Rubens Castilho Júnior, Departamento de  
Engenharia Elétrica.

1. Digissonda. 2. Ionosfera. 3. Clima Espacial. 4. Flare. I. Graduação  
em Engenharia Elétrica e Eletrônica. II. Santos, Rafael Lima dos. III. Título.

CDD – 621.38411

Ficha catalográfica elaborada por Shirlei Righeti – CRB-8/6995



**Universidade de Taubaté**

Autarquia Municipal de Regime Especial  
pelo Dec. Fed. nº 78.924/76  
Recredenciada Reconhecida pelo CEE/SP  
CNPJ 45.176.153/0001-22

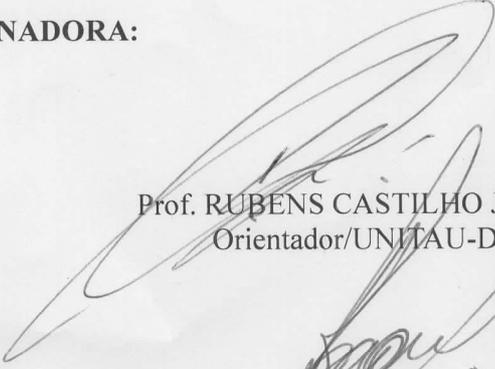
**Departamento de Engenharia Elétrica**  
Rua Daniel Danelli s/nº Jardim Morumbi  
Taubaté-Sp 12060-440  
Tel.: (12) 3625-4190  
e-mail: eng.eletrica@unitau.br

**ESTUDO DA ESTRUTURA DA DIGISSONDA E INTERPRETAÇÃO DE SEUS  
DADOS RELACIONADOS AO COMPORTAMENTO IONOSFÉRICO**

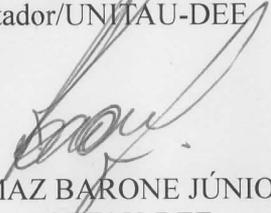
**RAFAEL LIMA DOS SANTOS  
THAINÁ DE OLIVEIRA BERTOLLOTTO**

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO PARTE  
DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE “GRADUADO EM  
ENGENHARIA ELÉTRICA”

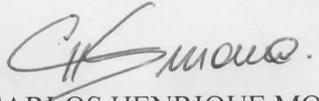
**BANCA EXAMINADORA:**



Prof. RUBENS CASTILHO JUNIOR  
Orientador/UNITAU-DEE



Prof. THOMAZ BARONE JÚNIOR  
UNITAU-DEE



Prof. CARLOS HENRIQUE MOURA  
UNITAU-DEE

Novembro de 2019

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar agradecemos a Deus, pela vida e as oportunidades guiadas por ele.

Aos nossos pais que jamais deixaram de nos incentivar, cuidar, guiar, amar e ensinar a sermos o que nos tornamos até hoje.

Aos amigos Clezio De Nardin e Laysa Resende por ajudar a desenvolver e orientar este tema durante três anos no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Agradecemos também pelas orientações pessoais que foram fundamentais para o desenvolvimento espiritual e deste trabalho.

A todos os amigos que permaneceram ao nosso lado durante toda a jornada de graduação e nas passagens da vida. A presença de todos foi essencial para o nosso amparo, conselhos e momentos bons.

*“Acreditar é a força que nos permite subir os maiores degraus da vida”*

## RESUMO

A região ionosférica da Terra é eletronicamente carregada por íons e elétrons livres e por isso é usada como meio de reflexão de ondas de rádio de alta frequência para comunicação de rádio. Ela é detectada pelas digissondas que são radares de superfície capazes de transmitir e receber ondas de rádio frequência. O sinal recebido é transformado em ionogramas que são gráficos de altura por frequência que ajudam a monitorar o comportamento da ionosfera. A ionosfera possui comportamento já conhecido, porém pode ser afetada por fenômenos externos como cisalhamento de ventos e flare solar (explosão solar). Na região de equador magnético, é possível ver nos ionogramas comportamentos específicos dos sinais dessa região e o fenômeno de contra eletrojato. Neste trabalho é apresentado o estudo do funcionamento de uma digissonda e os seus dados. Também é apresentado um estudo de caso de um flare de classe M6.5  $W/m^2$  ocorrido no dia 22 de junho de 2015 que mostra o comportamento das ondas de rádio diante deste evento.

**Palavras Chave:** Ionosfera; digissonda; clima espacial; flare; irregularidades.

## ABSTRACT

The ionospheric region of the earth is electronically charged by free ions and electrons and is therefore used as a means of reflecting high frequency radio waves for radio communication. It is detected by digisonde that are surface radars capable of transmitting and receiving radio frequency waves. The received signal is transformed into ionograms that are height-by-frequency graphs that help monitor the behavior of the ionosphere. The ionosphere has known behavior, but can be affected by external phenomena such as wind shear and solar flare. In the magnetic equator region, it is possible to see in the ionograms specific behaviors of the signals of this region and the counter electrojet phenomenon. This paper presents the study of the functioning of a digisonde and its data. Also presented is a case study of a class M6.5  $W/m^2$  flare on June 22, 2015 that shows the behavior of radio waves in the face of this event.

**Keywords:** Ionosphere; digisonde; space weather; flare; irregularities.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Processo de fotoionização e interação de moléculas na ionosfera.....	16
Figura 2.2: Perfil ionosférico de densidade eletrônica e perfil vertical.....	17
Figura 2.3: Camada Es do tipo "f" ( <i>flat</i> ) observada no dia 5 de janeiro de 2007 às 19:00 hrs da noite em Cachoeira Paulista.....	19
Figura 2.4: Camada Es do tipo "l" ( <i>low</i> ) observada no dia 4 de setembro de 2007 às 11:30 hrs da manhã em Cachoeira Paulista. ....	19
Figura 2.5: Camada Es do tipo "c" ( <i>cusp</i> ) observada no dia 11 de janeiro de 2007 as 18:45 hrs da tarde em Cachoeira Paulista.....	20
Figura 2.6: Camada Es do tipo "h" ( <i>high</i> ) observada no dia 4 de janeiro de 2007 às 19:15 hrs da noite em Cachoeira Paulista.....	20
Figura 2.7: Camada Es do tipo "a" ( <i>auroral</i> ) observada no dia 2 de junho de 2015 às 21:00 hrs da noite em São Luís. ....	21
Figura 2.8: Camada Es do tipo "q" ( <i>quite</i> ) observada no dia 2 de junho de 2015 às 21:00 hrs da noite em São Luís - MA.....	21
Figura 2.9: Propagação das bolhas ionosféricas.....	23
Figura 2.10: Evolução de uma instabilidade e geração de uma bolha ionosférica de acordo com a teoria de Rayleigh-Taylor .....	24
Figura 2.11: Bolha Ionosférica na região de São João do Cariri – PB no dia 22 de novembro de 2019 às 0051 UT.....	24
Figura 2.12: Evento de flare solar .....	26
Figura 3.1: Propagação das ondas de rádio em alta frequência no meio ionosférico.....	29
Figura 3.2: Propagação das ondas de rádio em alta frequência no meio ionosférico.....	29
Figura 3.3: Diagrama de blocos de uma ionossonda típica. ....	30
Figura 3.4: Digissonda DGS 256 e DPS-4 .....	32
Figura 3.5: Representação do sistema de uma digissonda DGS 256.....	34
Figura 3.6: Digissonda DPS-4.....	34
Figura 3.7: Layout da digissonda DPS-4.....	35
Figura 3.8: Diagrama de blocos da digissonda de modelo DSP-4. ....	37
Figura 3.9: Ionograma do dia 10 de abril de 2007 à 0015 UT para a estação de Cachoeira Paulista que mostra o perfil das componentes ordinárias e extraordinárias.....	38
Figura 3.10: Layout do programa SAO-X com demonstração de algumas ferramentas para monitoramento da ionosfera. ....	39

Figura 4.1: Ionograma da região de Boa Vista no dia 12 de março de 2015 às 0300 UT. .....	40
Figura 4.2: Sequência de ionogramas da região de São Luís no dia 03 de novembro de 2003 das 0900 UT às 1315 UT.....	41
Figura 4.3: Tipos de camadas Es mais comuns em baixas e médias latitudes vistas pela a estação de Cachoeira Paulista – SP. ....	42
.....	42
Figura 5.1: Fluxo de Raios-X para o dia 22 de junho de 2015.....	43
Figura 5.2: Parâmetro fbEs para as três regiões de estudo em 22 de junho de 2015.....	44
Figura 5.3: Parâmetro fminF para as três regiões de estudo em 22 de junho de 2015...	44
Figura 5.4: Ionogramas da região de Boa Vista no dia 22 de junho de 2015.....	45
Figura 5.5: Ionogramas da região de Cachoeira Paulista no dia 22 de junho de 2015...	46
Figura 5.6: Ionogramas da região de São Luís no dia 22 de junho de 2015.....	47

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

RF – Rádio frequência

RR – Roraima

SP – São Paulo

MA – Maranhão

EMBRACE – Estudo e Monitoramento Brasileiro do Clima Espacial

SAO-X – *SAO - Explorer*

GOES – *Geostationary Operational Environmental Satellites*

NOAA – *National Oceanic and Atmospheric Administration*

HF – *High Frequency*

EUV – Extremo Ultravioleta

Es – Esporádica

EEJ – Eletrojato Equatorial

CEJ – Contra Eletrojato

CME – Ejeção de Massa Coronal

SDO – *Solar Dynamics Observatory*

NASA – *National Aeronautics and Space Administration*

VFO – Osciladores de frequência variável

FFO – Osciladores de frequência fixa

Mbytes – Mega *bytes*

Gbytes – Giga *bytes*

UT – *Universal Time*

RIS – *Ionogram Real-Time Scaler*

## LISTA DE SÍMBOLOS

W – Watts

km – Quilômetros

m<sup>2</sup> – Metros quadrados

*q* – *Quiet*

*f* – *Flat*

*l* – *Low*

*c* – *Cusp*

*h* – *High*

*a* – *Auroral*

Å – Ångström

O<sub>2</sub><sup>+</sup> – dioxigenil

N<sub>2</sub><sup>+</sup> – Íon Nitrogênio

NO<sup>+</sup> – Íon Óxido Nítrico

N<sub>2</sub> – Nitrogênio

O<sup>+</sup> – Oxigênio

Ω – Ohms

Hz – *Hertz*

MHz – *Mega Hertz*

kHz – *Kilo Hertz*

Hz – *Hertz*

*fbEs* – Frequência máxima de bloqueio da camada esporádica

*fminF* – Frequência mínima de bloqueio da região F

*h'F* – Altura mínima virtual do traço F

*h'E* – Altura mínima virtual do traço E

*h'Es* – Altura mínima virtual do traço Esporádico

*foF2* – Frequência crítica da camada F2

*foF1* – Frequência crítica da camada F1

*foEs* – Frequência crítica da camada esporádica

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
1.1 MOTIVAÇÃO .....	15
1.2 OBJETIVO .....	15
1.3 METODOLOGIA .....	15
<b>CAPÍTULO II - Ionosfera .....</b>	<b>16</b>
2.1 Características .....	16
2.2 Região D .....	18
2.3 Região E.....	18
2.3.1 <i>Camadas E – esporádicas (Es)</i> .....	18
2.4 Região F .....	22
2.4.1 <i>Camada F1</i> .....	22
2.4.2 <i>Camada F2</i> .....	22
2.5 Irregularidades Ionosféricas.....	22
2.5.1 <i>Bolhas Ionosféricas</i> .....	22
2.5.2 <i>Eletrojato Equatorial e o Contra Eletrojato</i> .....	24
2.5.3 <i>Cisalhamento dos Ventos</i> .....	25
2.6 Sol.....	25
2.6.1 <i>Flare Solar</i> .....	26
<b>CAPÍTULO III - Digissonda .....</b>	<b>28</b>
3.1 Funcionamento e Características Gerais da Digissonda .....	28
3.1.1 <i>Modelo DGS 256</i> .....	33
3.1.2 <i>Modelo DPS-4</i> .....	34
3.3 Dados de Digissonda .....	37
<b>CAPÍTULO IV – Resultados I – Estudo da influência das irregularidades nos dados de digissonda. ....</b>	<b>40</b>
<b>CAPÍTULO V – Resultados II – Estudo de caso da influência do flare solar nos dados de digissonda. ....</b>	<b>43</b>
<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>48</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>49</b>

## CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO

A ionosfera é a camada eletronicamente carregada da Terra que se apresenta entre 60 a 1500 km de altitude. Ela é dividida nas regiões D, E e F cujo a região E pode ainda ser subdividida em camada E e E esporádica (Es) e a região F poder ser dividida em camada F1, F2 e até mesmo em F3. A camada Es pode ser classificada de acordo com sua morfologia nos ionogramas em *q (quite)*, *f (flat)*, *l (low)*, *c (cusp)*, *h (high)* e *a (auroral)* (PIGGOT; RAWER, 1972). O meio ionosférico, por ser uma região de alta ionização, pode ser afetada por fenômenos solares como o flare solar (explosão solar). Os eventos da ionosfera são detectados através da digissonda que é um radar de superfície com objetivo de emitir e receber ondas de rádio frequência (RF) transmitidos verticalmente. Quando essa onda chega no meio ionosférico, ela é refletida e refratada. Quando refletido o sinal, o equipamento capta a onda recebida e através do tempo que ela leva entre o processo de transmissão e captação, é possível saber a altura virtual e a frequência do meio em que foi refletido formando um perfil característico para cada região mostrado nos gráficos de altura por frequência denominados de ionogramas. Nesse trabalho será mostrado o processo de transmissão e recepção dos sinais provenientes da digissonda bem como o processo de leitura e processamento desses dados até a formação dos ionogramas utilizados para as análises do perfil ionosférico. Também será apresentado um estudo de caso de influência do flare solar no comportamento da ionosfera no dia 22 de junho de 2015 para as regiões de Boa Vista – RR, Cachoeira Paulista – SP e São Luís – MA.

## **1.1 MOTIVAÇÃO**

Este trabalho é motivado pela contribuição com o monitoramento do perfil ionosférico estudando o funcionamento da digissonda e a interpretação dos dados obtidos relacionado com os fenômenos presente nesta região para orientar e ter diagnósticos preciso dos eventos que podem influenciar na propagação das ondas de rádio.

## **1.2 OBJETIVO**

O objetivo deste trabalho foi de estudar a estrutura eletrônica da digissonda desde o seu processo de transmissão até a recepção do sinal emitido. Também foi estudado o processamento e leitura dos sinais realizado pelo equipamento até ser gerado os ionogramas, que são os gráficos de altura por frequência utilizados para a análise do perfil ionosférico. Para complementar, foi estudado um caso de influência de flare solar na ionosfera utilizando os dados provenientes da digissonda.

## **1.3 METODOLOGIA**

Para realizar este trabalho, foi feita uma revisão bibliográfica e leitura dos manuais de uma digissonda típica e dos modelos fixados em cada região analisada. Também foram utilizados dados de ionogramas adquiridos através do grupo EMBRACE (Estudo e Monitoramento Brasileiro do Clima Espacial) administrado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e foram processados através do programa SAO – EXPLORER (SAO –X). Os dados de flare solar para a análise de influência no meio ionosférico foram obtidos pelo satélite GOES (*Geostationary Operational Environmental Satellites*) operado pelo NOAA.

## CAPÍTULO II - Ionosfera

A ionosfera é considerada a camada eletronicamente carregada da terra e é usada para propagação de ondas de rádio de alta frequência (HF). Essa região começou a ser estudada e foi descoberta em 1902 pelos cientistas Arthur Kennelly e Oliver Heaviside (SARMENTO, 2009). A fim de proporcionar a comunicação via rádio, a ionosfera passou a ser estudada a nível global. As variações espaciais e temporais são capazes de influenciar no meio ionosférico e alterar o seu perfil eletrônico, capaz de prejudicar a propagação das ondas de rádio HF nessa região.

### 2.1 Características

A ionosfera se concentra entre 60 a 1500 km de altitude e sua principal característica é a interação entre átomos e moléculas neutras na atmosfera, gerando uma concentração de átomos livres através da fotoionização e do processo corpuscular. Por esse fenômeno, ela é considerada a atmosfera ionizada da Terra (AMORIM, 2010).

O processo corpuscular consiste no fato da fotoionização, que é o processo onde as moléculas de gases presentes na ionosfera absorvem as faixas espectrais EUV e Raios-X a ponto de retirar partículas altamente ionizadas da órbita dos átomos neutros como pode ser observado na figura 2.1. Essas partículas ionizadas com elevada energia cinética causam a ionização através das partículas neutras e o número de íons produzidos é proporcional ao número de partículas ionizáveis (KIRCHHOFF, 1991).

Figura 2.1: Processo de fotoionização e interação de moléculas na ionosfera.

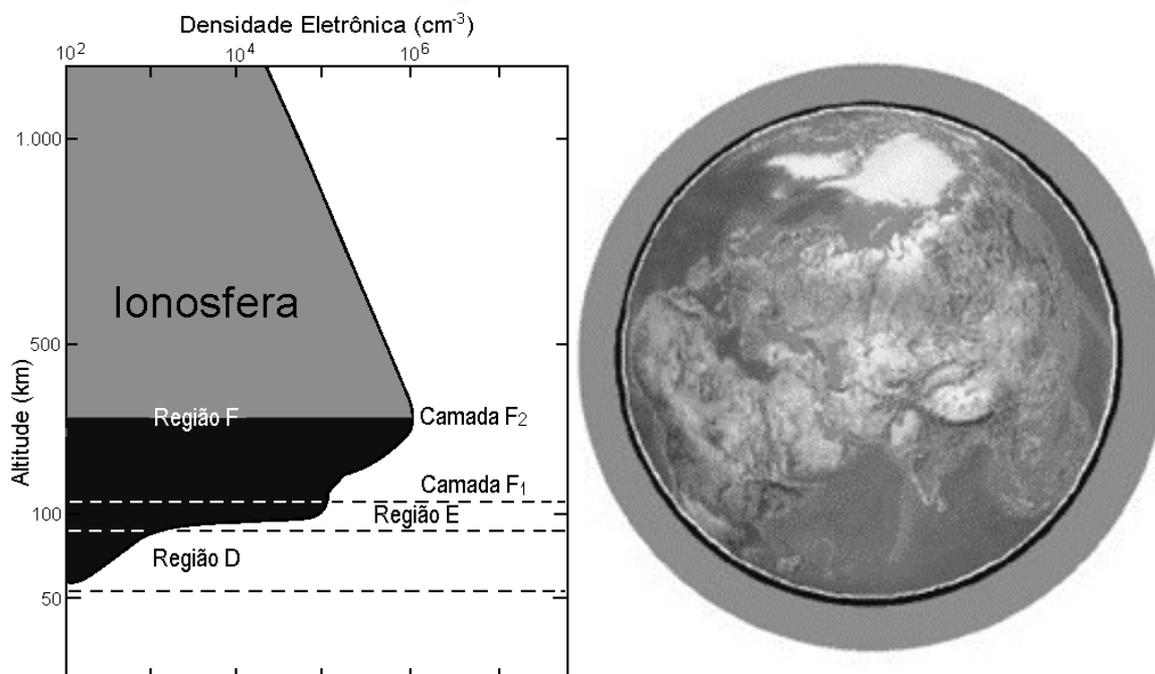


Fonte: adaptada Bugoslavskaya, (1968) apud El Gizawy,(2003).

Na ionosfera ocorre o processo de reflexão das ondas de rádio HF cujo o intervalo de frequência depende de várias características e fenômenos que ocorrem na ionosfera. Os sinais emitidos viajam até o meio ionosférico e são refratados e refletidos em direção a Terra após percorrer distâncias significativas. O instrumento utilizado para a medição desses parâmetros do sinal é chamado de ionossonda, que será melhor abordado nos capítulos a seguir.

A ionosfera possui diferentes regiões e camadas delimitadas verticalmente por suas características de densidade eletrônica e comportamento. A figura 2.2 Demonstra o perfil vertical e de densidade do meio ionosférico. Na figura, é possível observar que existe um pico de densidade máxima da ionosfera que é explicado devido a radiação eletromagnética na atmosfera mais densa produzindo maior quantidade de elétrons livres que acaba aumentando a densidade eletrônica num nível máximo. Abaixo deste nível, mesmo que haja o aumento da densidade na atmosfera neutra, a produção de elétrons decresce, pois, a maior parte da radiação ionizante já foi absorvida pelas camadas superiores e taxa de perda de elétrons predomina sobre a taxa de produção de elétrons. Devido as diferentes taxas de absorção e aos diferentes constituintes atmosféricos são denominadas as regiões D, E e F (SALOMONI, 2008).

Figura 2.2: Perfil ionosférico de densidade eletrônica e perfil vertical.



Fonte: Denardini, (2006).

## 2.2 Região D

A região D é caracterizada por ser a camada mais baixa da ionosfera se localizando entre 60 a 95 km (DENARDINI, 2003). Essa camada é a menos densa em elétrons, podendo não ser detectada durante a noite (SANTANA, 2001). Quando se trata de rádio propagação, a região D pode atenuar, refletir e/ou absorver as ondas de rádio. Nos aspectos químicos, sua composição é a mais complexa (DENARDINI, 2003) e suas principais fontes de ionização são:

- Raios - X ( $l < 10 \text{ \AA}$ ): produzem  $O_2^+$ ,  $N_2^+$ ;
- Radiação Lyman- $\alpha$  ( $l = 1216 \text{ \AA}$ ): produz  $NO^+$ ;
- Raios cósmicos: ionizam principalmente nas alturas inferiores da região D;
- Radiação na faixa do EUV (com comprimento de onda entre 1027 e 1118  $\text{\AA}$ );
- Partículas de origem solar ou auroral.

## 2.3 Região E

A região E está localizada entre 90 a 150 km de altitude (SANTANA, 2001). A sua densidade eletrônica é proveniente do sol e seu pico de densidade é dado ao meio dia local por ser o maior período de incidência do Sol e ao anoitecer, há uma queda significativa dessa densidade (BISPO, 2000). Nesta região há a presença de íons metálicos como  $Mg^+$  e  $Fe^+$  onde a presença deles é creditada na desintegração meteórica pelo atrito com a atmosfera terrestre e na formação das camadas E esporádicas (Es). Como característica, as camadas Es tendem a refletir as ondas de rádio devido a sua densidade eletrônica (DENARDINI, 2001).

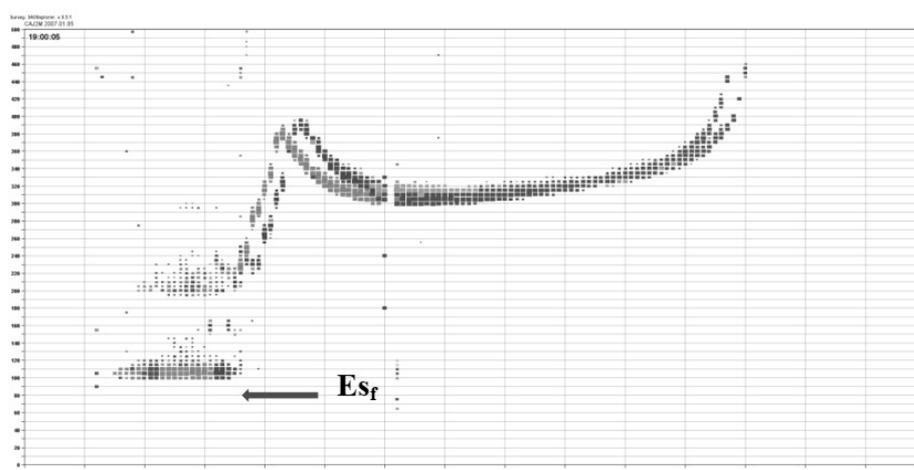
### 2.3.1 Camadas E – esporádicas (Es)

As camadas Es são denominadas como adensamento do plasma que ocorrem nas alturas da região E. Essas camadas possuem diferentes altitudes e latitudes que podem ser classificadas em:

- Camadas de alta latitudes: são associadas a precipitação de partículas em regiões aurorais e a campos elétricos;
- Camadas de médias e baixas latitudes: são associadas ao fenômeno de cisalhamento de ventos (WHITEHEAD, 1989, HOOK, 1997; LANCHESTER ET AL., 2001);
- Camadas de regiões equatoriais: associadas a irregularidade presente no Eletrojato Equatorial (RASTOGI, 1971).

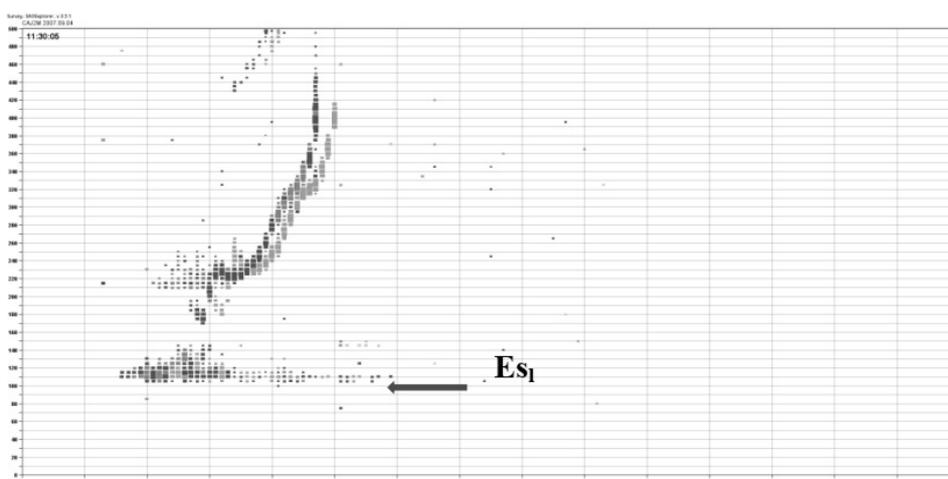
Essas camadas são classificadas de acordo com sua morfologia nos gráficos de altura por frequência detectado pelas digissondas e são classificados como *f* (*low*, figura 2.3), *l* (*low*, figura 2.4), *c* (*cusp*, figura 2.5), *h* (*high*, figura 2.6), *a* (*auroral*, que é mais comum em altas latitudes, mas podem aparecer em baixas e médias latitudes, figura 2.7) e *q* (*quite*, comum nas regiões equatoriais apresentada na figura 2.8 (SMITH, 1957). A camada do tipo *q* é transparente a ondas de rádio e não bloqueia as camadas superiores. Seu aparecimento é comum durante o dia.

Figura 2.3: Camada Es do tipo "*f*" (*flat*) observada no dia 5 de janeiro de 2007 às 19:00 hrs da noite em Cachoeira Paulista.



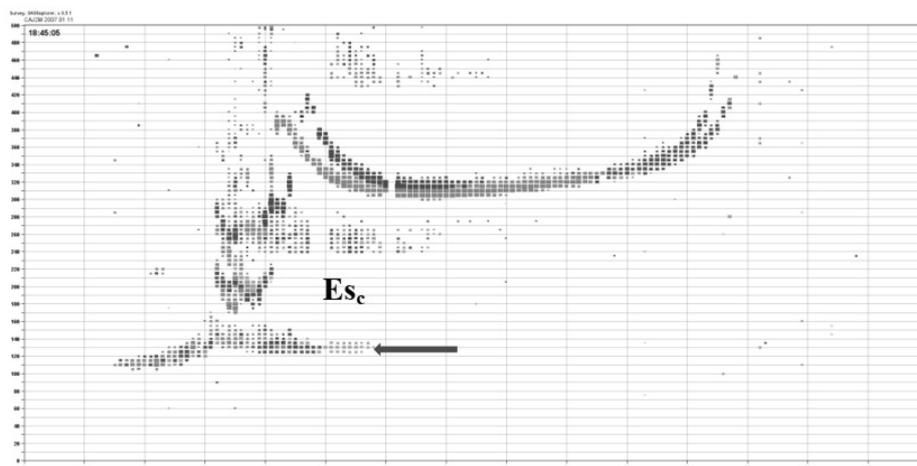
Fonte: Autoria própria.

Figura 2.4: Camada Es do tipo "*l*" (*low*) observada no dia 4 de setembro de 2007 às 11:30 hrs da manhã em Cachoeira Paulista.



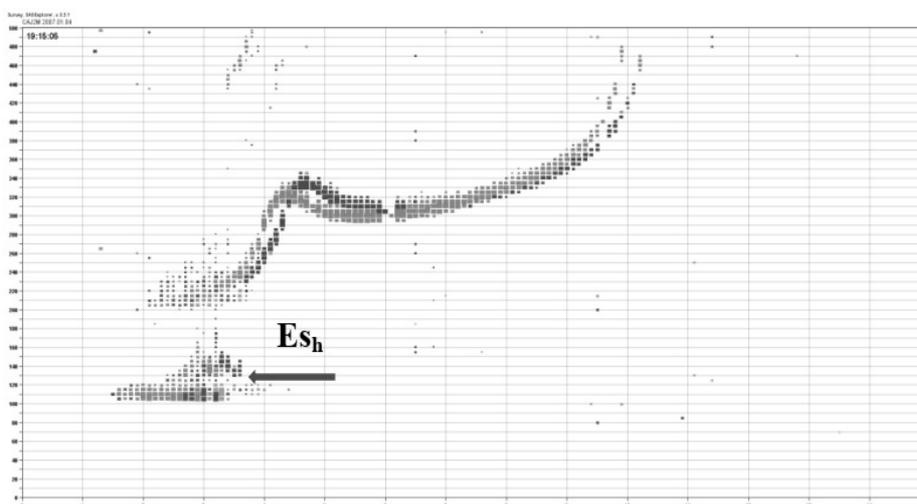
Fonte: Autoria própria.

Figura 2.5: Camada Es do tipo "c" (*cusp*) observada no dia 11 de janeiro de 2007 às 18:45 hrs da tarde em Cachoeira Paulista.



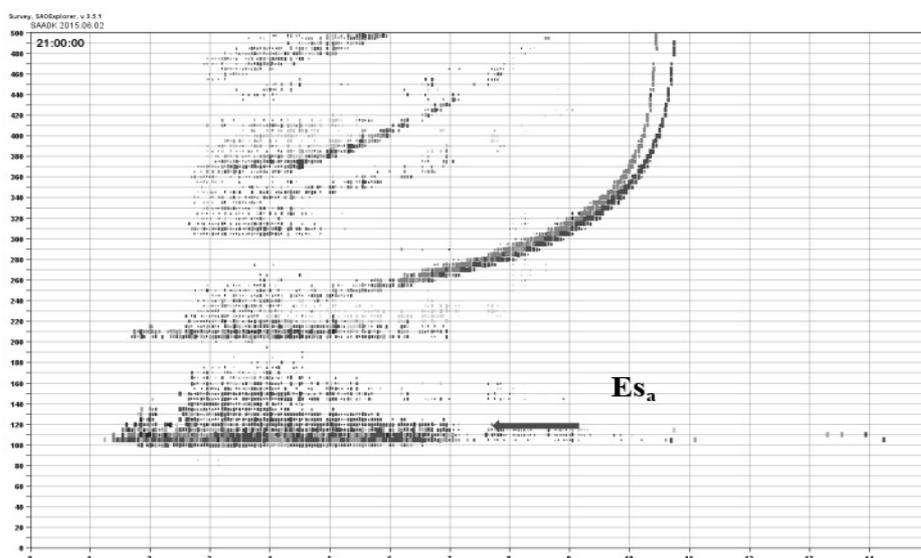
Fonte: Autoria própria.

Figura 2.6: Camada Es do tipo "h" (*high*) observada no dia 4 de janeiro de 2007 às 19:15 hrs da noite em Cachoeira Paulista.



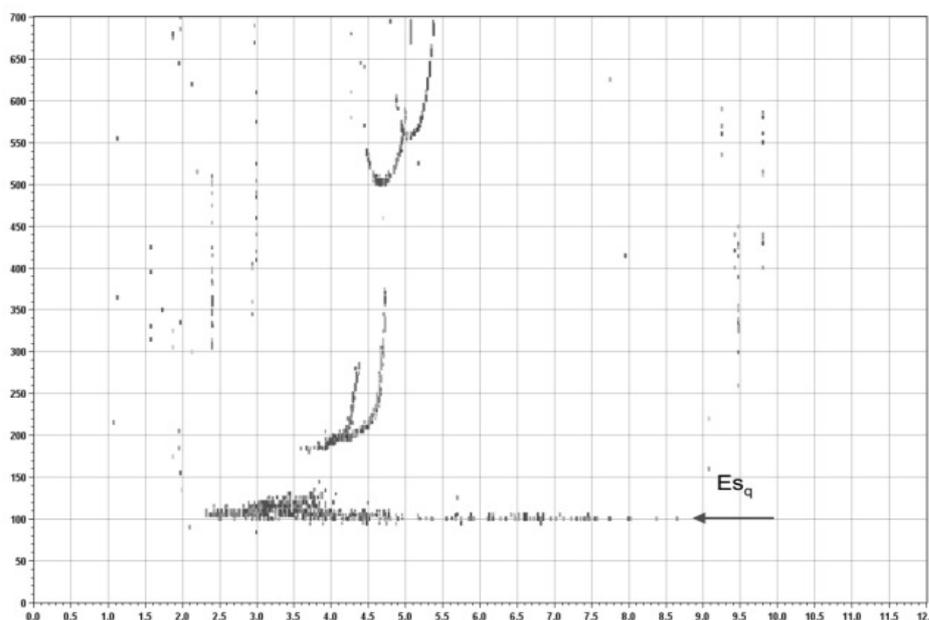
Fonte: Autoria própria.

Figura 2.7: Camada Es do tipo “a” (*auroral*) observada no dia 2 de junho de 2015 às 21:00 hrs da noite em São Luís.



Fonte: Autoria própria.

Figura 2.8: Camada Es do tipo “q” (*quite*) observada no dia 2 de junho de 2015 às 21:00 hrs da noite em São Luís - MA.



Fonte: Autoria própria.

## **2.4 Região F**

A região F se concentra entre 90 a 1000 km de altitude e pode ser subdividida em camada F1 e F2 e em determinados casos, podem aparecer a camada F3. A camada F1 quando fundida com a camada F2 dá origem a região F (SILVA, 2013).

### *2.4.1 Camada F1*

A camada F1 encontra-se em 150 a 200 km de altitude e sua observação é predominante durante o dia, sendo mais pronunciada no verão. O principal íon da camada F1 é o  $O^+$  e a espécie molecular predominante é o  $N_2$  (ARANHA, 2006; DENARDINI, 1999). Essa camada refletora de ondas de rádio é a que possui maior densidade do plasma.

### *2.4.2 Camada F2*

A camada F2 localiza-se entre 200 a 1000 km e é nela em que ocorre o pico de densidade eletrônica de grande importância na reflexão das ondas de rádio de alta frequências quanto de dia quanto de noite (BATISTA ET AL., 2002). Durante o dia, ela apresenta alta concentração de elétrons e de noite essa densidade decai. No entanto, mesmo com o decaimento no período noturno, a densidade dessa camada continua significativa para a propagação dos sinais de rádio HF (DENARDINI, 2001). A figura 2.9 representa o perfil ionosférico característico do período noturno e do período diurno.

## **2.5 Irregularidades Ionosféricas**

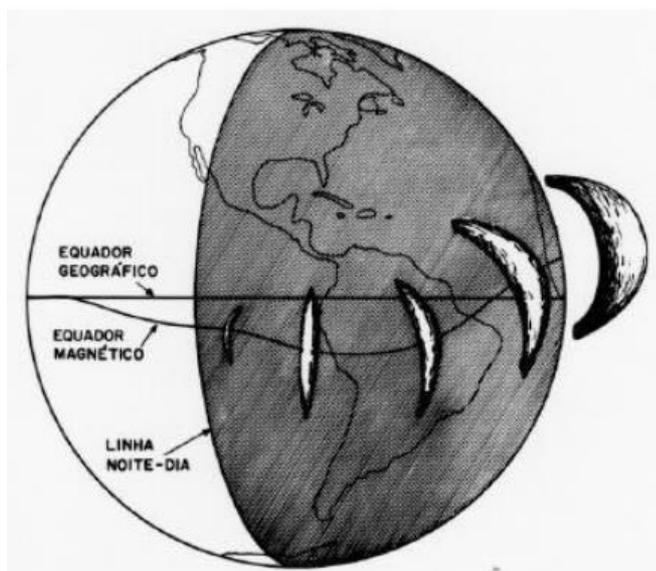
Dentro da ionosfera podem ocorrer irregularidades que causam interferência do perfil ionosférico, atrapalhando a propagação e reflexão das ondas de rádio e da leitura deste perfil nos ionogramas. Devido a isso, as principais irregularidades que serão discutidas são nas próximas sessões são: Bolhas Ionosféricas, Eletrojato Equatorial (EEJ) e Contra Eletrojato (CEJ) e Cisalhamento de Ventos.

### *2.5.1 Bolhas Ionosféricas*

As bolhas ionosféricas ou bolhas de plasma são regiões onde ocorrem a rarefação do plasma ionosférico, ou seja, redução da concentração do plasma, provocando interferência nos sinais de satélite. São perturbações presente na região F que dependem de atividade solar para ocorrerem. Elas são mais características nas regiões tropicais e são comuns durante o período noturno. Seu surgimento tem intervalo médio de 90 minutos, podendo ser alterado de acordo

com o aumento das explosões solares (FONSECA; SOUZA, 2003). Seu desenvolvimento tem início no equador magnético (figura 2.9) se propagando transequatorialmente ao longo das linhas de força do campo geomagnético (ABDU ET AL., 1991).

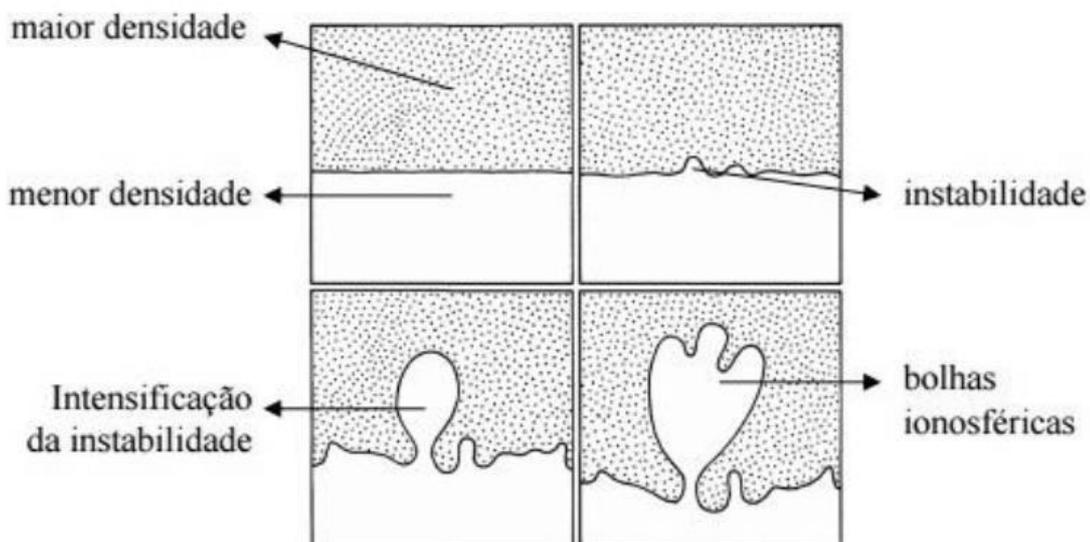
Figura 2.9: Propagação das bolhas ionosféricas.



Fonte: Sobral, (1999).

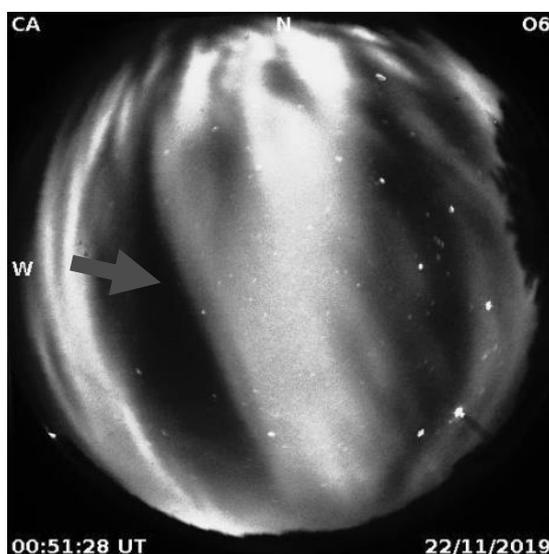
Seu surgimento é baseado na teoria de *Rayleigh-Taylor*. Essa teoria diz que um meio mais denso quando sustentado por um meio menos denso, sob a ação da gravidade, resulta em desequilíbrio do meio. Este desequilíbrio pode ser rompido assim que introduzido uma pequena instabilidade, que sob condições especiais, desenvolvem-se formando as bolhas ionosféricas (Santana, 2001). A figura 2.10 demonstra a evolução da instabilidade e a geração da bolha ionosférica. A figura 2.11 é de um imageador usado pelo grupo EMBRACE para a verificação da ocorrência de bolhas ionosféricas. A bolha ocorreu no dia 22 de novembro de 2019 às 0051 UT.

Figura 2.10: Evolução de uma instabilidade e geração de uma bolha ionosférica de acordo com a teoria de Rayleigh-Taylor



Fonte: Kelley, (1989).

Figura 2.11: Bolha Ionosférica na região de São João do Cariri – PB no dia 22 de novembro de 2019 às 0051 UT.



Fonte: EMBRACE, (2019).

### 2.5.2 Eletrojato Equatorial e o Contra Eletrojato

O Eletrojato Equatorial é uma corrente centrada no equador magnético e na região E. Ela possui 600 km de extensão na direção norte-sul e 90 a 120 km de altitude. Seu fluxo varia

de leste durante o dia e vai para oeste durante a noite. Seu controle é dado pelo sistema global de campos elétricos, chamado de dínamo ionosférico (DENARDINI, 1999). O EEJ é o responsável por gerar o sistema de forças elétricas que regem na distribuição do plasma ionosférico em baixas latitudes e assim interfere nas características de radiopropagação.

Dentro do EEJ podemos ter duas irregularidades denominadas de Ecos do Tipo 1 ou Instabilidade de Dois-Feixe Modificada (*two-stream*) e Ecos do Tipo 2 ou Deriva de Gradiente (*gradiente drift*). Os Ecos do Tipo 2 podem aparecer desde os primeiros horários da manhã até o pôr-do-sol e é o principal evento responsável pela formação das camadas E – esporádicas do tipo “q” no setor brasileiro (DENARDINI, 1999). Para inibir a formação das camadas Es do tipo “q”, ocorre o Contra Eletrojato Equatorial que é uma inversão do campo elétrico de polarização e de densidade eletrônica, podendo inverter as derivas de irregularidades na região ionosféricas (RESENDE, 2002).

### 2.5.3 Cisalhamento dos Ventos

O cisalhamento de ventos é denominado basicamente pela mudança de sentido e de amplitude dos ventos que ocorrem na região E. Essa mudança é capaz de acumular íons e elétrons numa fina camada que acaba interferindo na reflexão das ondas de rádio. Os ventos de cisalhamento podem ser de convergência zonal ou meridional. Quando se tem ventos de convergência zonal, é comum que seja formado camadas Es de baixa e médias latitudes. Já os ventos de convergência meridional, são mais comuns para as camadas Es de alta latitudes. Esse fenômeno não ocorre no equador magnético.

## 2.6 Sol

O sol é considerado uma estrela por ter luminescência própria e por ser formado pelo os gases Hélio, Hidrogênio, Carbono e Oxigênio. Sua matéria possui o estado de plasma ionizado e massa de 332.959 vezes maior que a Terra. O seu núcleo gera energia através de reação termonucleares e sua gravidade é 28 vezes maior que a da Terra. A capacidade de produção energética do Sol é o equivalente a 10 bilhões de hidrelétricas de Itaipu (STENSMANN, 2002). O hidrogênio quando submetido a uma alta pressão e temperatura, possibilita com que as reações ocorram. O hidrogênio da reação se transforma em Hélio que libera uma energia de  $10^{12}$ J na forma de radiação composta principalmente de Raios Gama e Raios-X. Essa energia é liberada em direção a Terra no formato luz e calor com potência de 1400 W (STENSMANN, 2002). Sua estrutura interna consiste em três regiões distintas chamadas de núcleo, zona

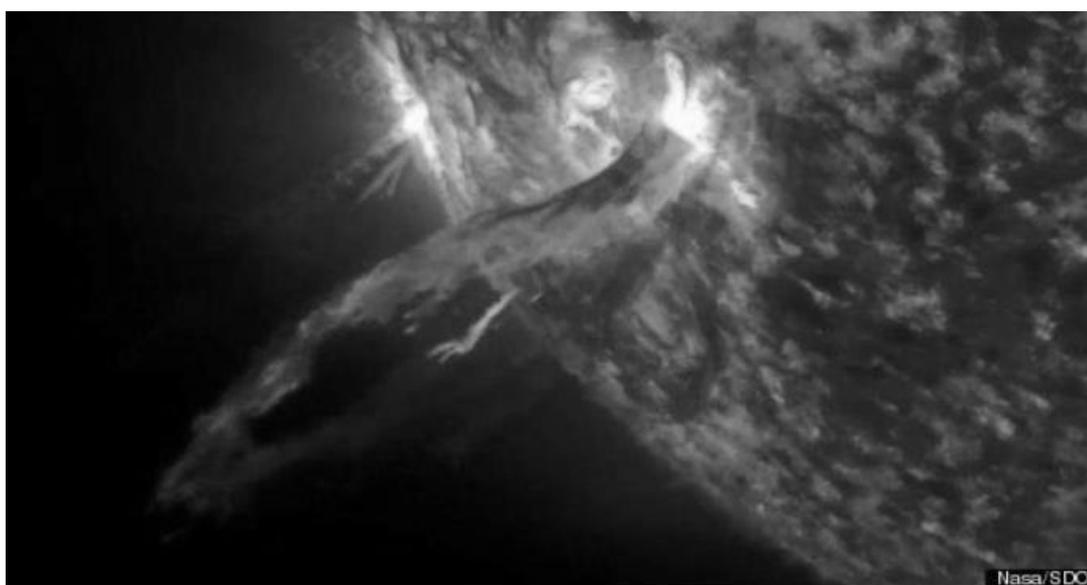
radiativa e zona convectiva, com cada uma delas apresentando um processo químicos e físico específico. A estrutura externa é dividida de acordo com a sua funcionalidade em fotosfera, cromosfera, zona de transição e coroa.

O sol possui certas atividades acompanhadas pelos cientistas que modificam a atmosfera terrestre e interferem no funcionamento de equipamentos importantes para o convívio diário da população. As atividades solares são consideradas fenômenos cíclicos ligados a rotação e a variação do campo magnético do sol. Estes fenômenos variam a cada 11 anos aproximadamente tendo épocas de alta e baixa ocorrência de eventos, definindo o ciclo solar. Algumas das atividades solares acompanhada pelos órgãos de estudos são: manchas solares, protuberâncias e proeminências, erupções solares, ejeções de massas coronais (CME), vento solar e flare, sendo esse último o principal ionizante da ionosfera e, portanto, será o evento estudado nesse trabalho.

#### *2.6.1 Flare Solar.*

O flare solar são explosões provenientes do sol em direção a Terra carregados de partículas e comprimento de onda de Raios-X e Raios Gama (KOOP ET AL, 2005). Eles ocorrem quando energias armazenadas em campos magnéticos próximo a manchas solares é rapidamente liberada em direção a Terra. Esse evento geralmente leva menos tempo do que uma CME para chegar à atmosfera terrestre e são observados como áreas brilhantes pelos satélites de monitoramento do sol. A figura 2.12 mostra um evento de flare solar captado pelo satélite SDO operado pela NASA em 2003.

Figura 2.12: Evento de flare solar



Fonte: NASA/SDO, (2003).

As explosões solares podem ser classificadas de acordo com a sua intensidade observado pelos parâmetros provenientes do satélite GOES operado pelo NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*). Suas classificações são:

- As explosões da classe X, as quais têm associadas a elas Raios-X com a intensidade a partir de  $10^{-4}$  W/m<sup>2</sup>;
- As explosões da classe M, as quais têm associadas a elas Raios-X com a intensidade entre  $10^{-5}$  e  $10^{-4}$  W/m<sup>2</sup>;
- As explosões da classe C, as quais têm associadas a elas Raios-X com a intensidade entre  $10^{-6}$  e  $10^{-5}$  W/m<sup>2</sup>;
- As explosões da classe B, as quais têm associadas a elas Raios-X com a intensidade entre  $10^{-7}$  e  $10^{-6}$  W/m<sup>2</sup>; e
- As explosões da classe A, as quais têm associadas a elas Raios-X com a intensidade entre  $10^{-9}$  e  $10^{-7}$  W/m<sup>2</sup>.

## CAPÍTULO III - Digissonda

Para comunicação de ondas de rádio, faz-se necessário o estudo sobre a ionosfera de maneira global, uma vez que variações espaciais e temporais desse meio ocorre com determinada frequência e prejudica a propagação dessas ondas. O instrumento desenvolvido para estudar a ionosfera é chamado de sondadores ionosféricos ou ionossonda. A ionossonda foi desenvolvida nos anos de 1920 e 1930 e o processo para obtenção dos parâmetros ionosféricos eram feitos de modo manual. A partir do desenvolvimento tecnológico em 1960, passaram a ser chamadas de digissonda adquirindo a capacidade de obtenção de 49 parâmetros da ionosfera com maior precisão. A digissonda é um radar de superfície que emite pulsos de rádio frequência (RF) para a ionosfera através de uma antena transmissora e recebe esse mesmo pulso refletido pelo meio ionosférico através de um conjunto de antenas receptoras, com o objetivo de estudar o comportamento de densidade das regiões E e F ionosféricas. Nos tópicos seguintes, serão explicadas as especificações de uma digissonda (DAVIES, 1965).

### 3.1 Funcionamento e Características Gerais da Digissonda

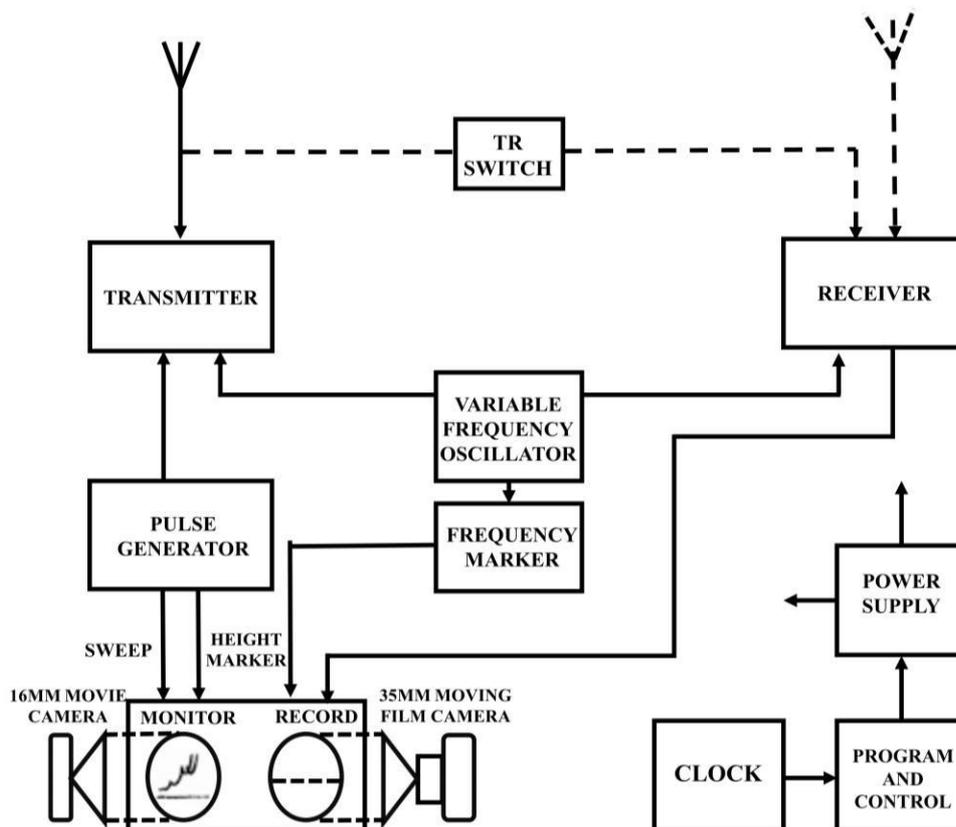
A digissonda possui capacidade de emitir ondas RF de alta frequência verticalmente em alturas na faixa de 100 a 1360 km com frequências variáveis entre 0,5 até 30 MHz e potência de pico de 600W (ALMEIDA, 2006). Sua função é medir o tempo em que o pulso de RF, emitido pela antena transmissora, ocupa para viajar até a ionosfera, ser refletida e detectada pelo conjunto de antenas receptoras do tipo delta. Pela equação 1 é possível obter a altura virtual ( $h'$ ) do sinal refletido. A constante de tempo ( $ct$ ) nesse caso é dado em microssegundos.

$$h' = \frac{1}{2}ct = 0,15t \quad (1)$$

Através do tempo decorrido entre a transmissão e a recepção e da frequência da onda, são gerados gráficos de altura por frequência chamados de ionogramas. A figura 3.1 representa o processo de transmissão da onda RF pela digissonda e a reflexão deste sinal pelo o meio ionosférico. Na figura 3.2 é possível verificar a interação da ionosfera com as ondas RF.



Figura 3.3: Diagrama de blocos de uma ionossonda típica.



Fonte: Davies, (1965).

O transmissor e o receptor possuem conexão simultânea proveniente de uma ligação eletrônica ou mecânica. O sinal de saída do receptor é exibido em um osciloscópio juntamente com marcadores de frequência e tempo (altura).

Estes sinais são geralmente aplicados sob forma de pulsos que varrem um traço a cada  $\frac{1}{3}, \frac{2}{3}$  ou  $6\frac{2}{3}$  milissegundos correspondendo ao grupo de altura de 50, 100 e 600 km, respectivamente. Além disso, como a frequência do transmissor é variada, todo o traço de varredura pode ser bloqueado por um curto intervalo à medida que a frequência passa por cada megaciclo (ou 0,1 MHz). Assim, uma grade de linhas de referência em frequência por altura pode ser determinada.

A diferença entre as frequências varia em um fator de 25 a 1, embora a variação do oscilador de varredura seja inferior de 2 até 1. O receptor utiliza o mesmo oscilador de varredura que o transmissor que converte a frequência de ecos recebidos para 30 MHz. Essa frequência é constante em toda a banda e é amplificada e detectada de uma maneira direta. As antenas comumente utilizadas são do tipo deltas verticais ou verticais rômbricas que, apesar de

possuírem impedância constante e resistiva, não são muito eficientes na extremidade de baixa frequência da varredura. Para isso, as antenas do tipo log periódicas apresentam melhor eficiência.

O gerador de pulsos fornece pulsos capazes de sensibilizar e acionar o transmissor. A exibição (display), emprega um cristal estável em 1,0 MHz juntamente com os circuitos de divisão de frequência para obtenção das frequências de 3 kHz, dos quais, por moldagem adequada, obtêm-se os marcadores de altura de 50 km. Para 500 Hz e 300 Hz obtêm-se marcadores de 100 km e 500 km, respectivamente. As marcas de calibração de frequência são obtidas quando o receptor é sintonizado através dos osciladores harmônicos de 1,0 MHz (DAVIES, 1965).

Sendo assim, a digissonda possui uma programação capaz de gravar dados dentro de um intervalo de 15 minutos, tendo a possibilidade de computar dados em um intervalo menor dependendo das especificações do equipamento utilizado e obedecendo aos limites práticos. Se a varredura for muito rápida, o receptor acaba perdendo dados por falta de sincronia com o eco refletido. Quando escolhido um período muito longo, as variações da ionosfera podem ocorrer mais rápido que a captação dos dados, tendo uma perda da interpretação do comportamento do meio durante o período que se tem os dados.

Em síntese, a digissonda é composta por:

- Antena transmissora, usada para emitir curtos pulsos de rádio;
- Antenas receptoras, usada para receber os pulsos de rádio transmitido. Essas antenas são do tipo Delta com cargas resistivas de 600  $\Omega$ ;
- Computadores, usado para o processamento dos dados obtidos;
- Periféricos, que são placas de expansão usadas para enviar ou receber informações do computador;
- Chave de antenas, usado para combinar e separar o sinal da antena terrestre;
- Receptor e Transmissor de pulsos de RF.

Os modelos mais representativos desse instrumento são a DG S256 e a DPS – 4 onde a tabela 1 mostra os modelos utilizado em cada região brasileira analisada neste trabalho. A figura 3.4 ilustra os modelos usados em cada região.

Tabela 1: Modelo de digissonda distribuído pelas regiões do setor brasileiro estudado.

<b>ESTAÇÃO</b>	<b>SONDA</b>
Boa Vista (MA)	DPS – 4
Cachoeira Paulista (SP)	DGS 256
São Luís (MA)	DGS 256

Figura 3.4: Digissonda DGS 256 e DPS-4



Fonte: LDI, (2009).

### 3.1.1 Modelo DGS 256

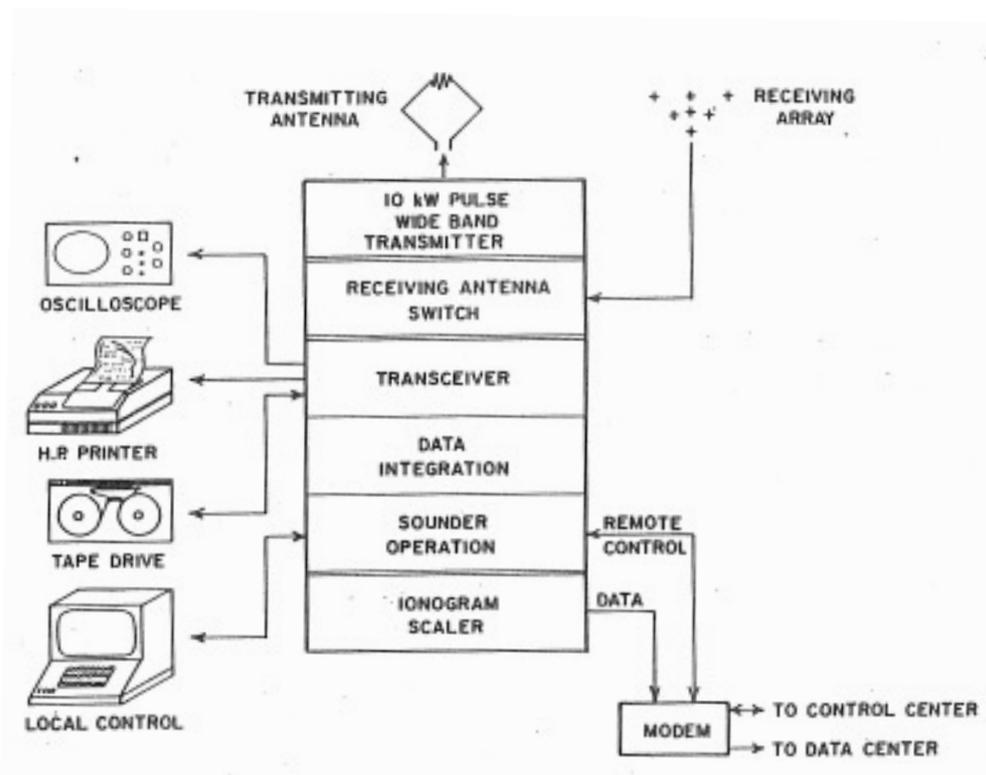
O modelo DGS 256 apresenta comando por um teclado de exibição de programa com um quadro principal composto por:

- Transceptor;
- Sintetizador;
- Analisador de espectro;
- Unidade de *timing* (*clock*);
- Controlador;
- Microcomputador de saída;
- Periféricos;

Nesse modelo, são necessários dois periféricos principais sendo um para o amplificador de potência de pulso de banda larga (transmissor) e um para a impressora. Os dados de saída também podem ser gravados remotamente. Também podem ser adicionados periféricos como gravador magnético, monitor, comutador de antena receptoras e um RIS (*Ionogram Real-Time Scaler*) para pós processamento de dados online.

Para a transmissão de dados é necessário antena de banda larga com impedância de 50  $\Omega$  sendo recomendado antenas do tipo rômbrica (antena em formato losangular) vertical de 600  $\Omega$  de impedância para um transformador de banda larga correspondente. Na recepção de dados, são recomendados de uma até sete antenas do tipo catraca (antena em formato hexagonal) ou recomenda-se o uso da própria antena transmissora. A figura 3.5 é um diagrama de blocos com a visão do funcionamento de todo o sistema.

Figura 3.5: Representação do sistema de uma digissonda DGS 256.



Fonte: Bibl et al, (1981).

### 3.1.2 Modelo DPS-4

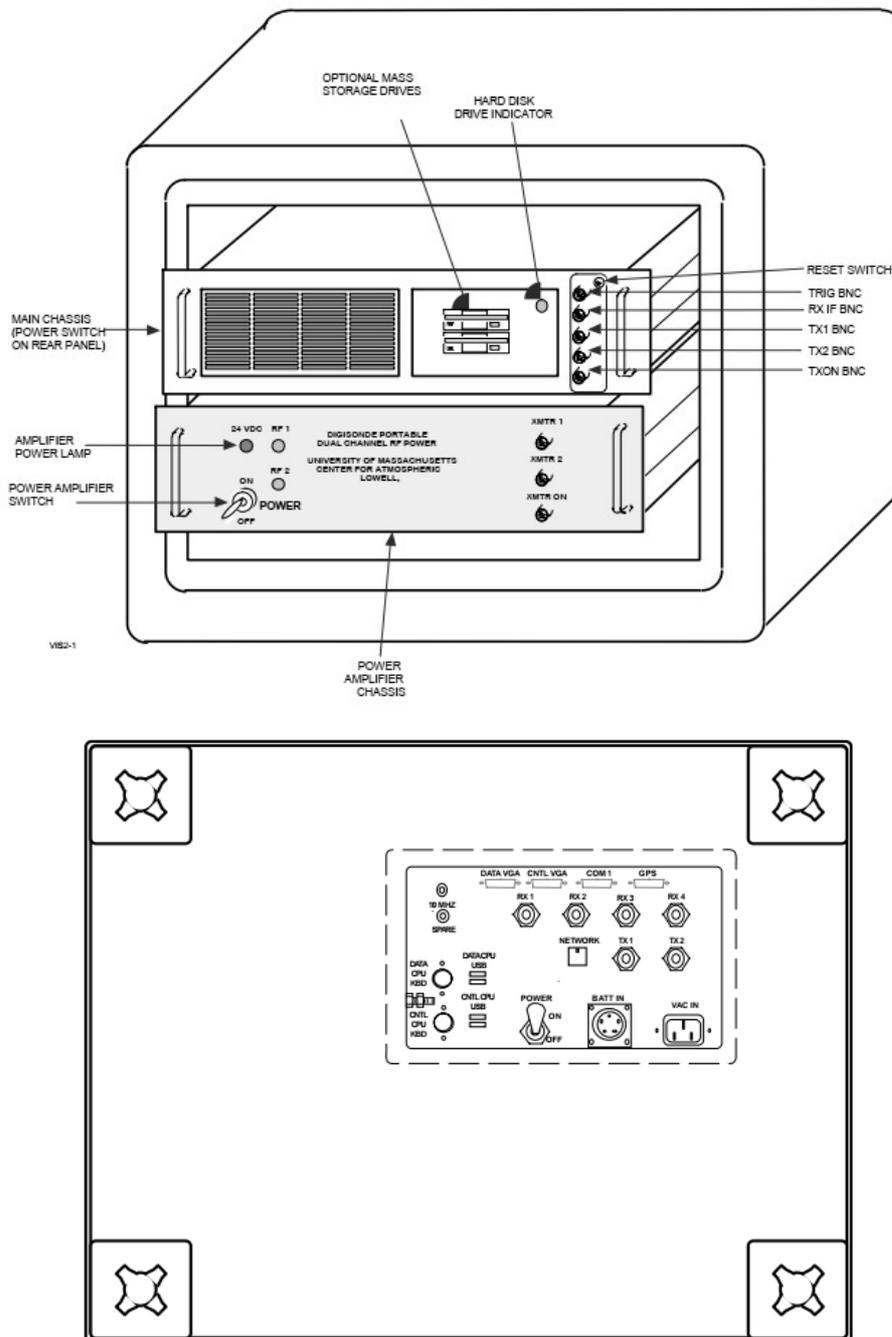
O modelo DPS-4 (figura 3.6) é composto de um subsistema que consiste fisicamente em dois chassis sobrepostos resfriados por ventilador fixadas em um rack de 19" protegidos por uma estrutura externa de fibra de vidro com ventilação forçada. A figura 3.7 representa o *layout* estrutural desse modelo de digissonda.

Figura 3.6: Digissonda DPS-4.



Fonte: Aatoria própria.

Figura 3.7: Layout da digissonda DPS-4.



Fonte: LDI, (2009).

O chassi principal (superior) compreende os seguintes conjuntos funcionais:

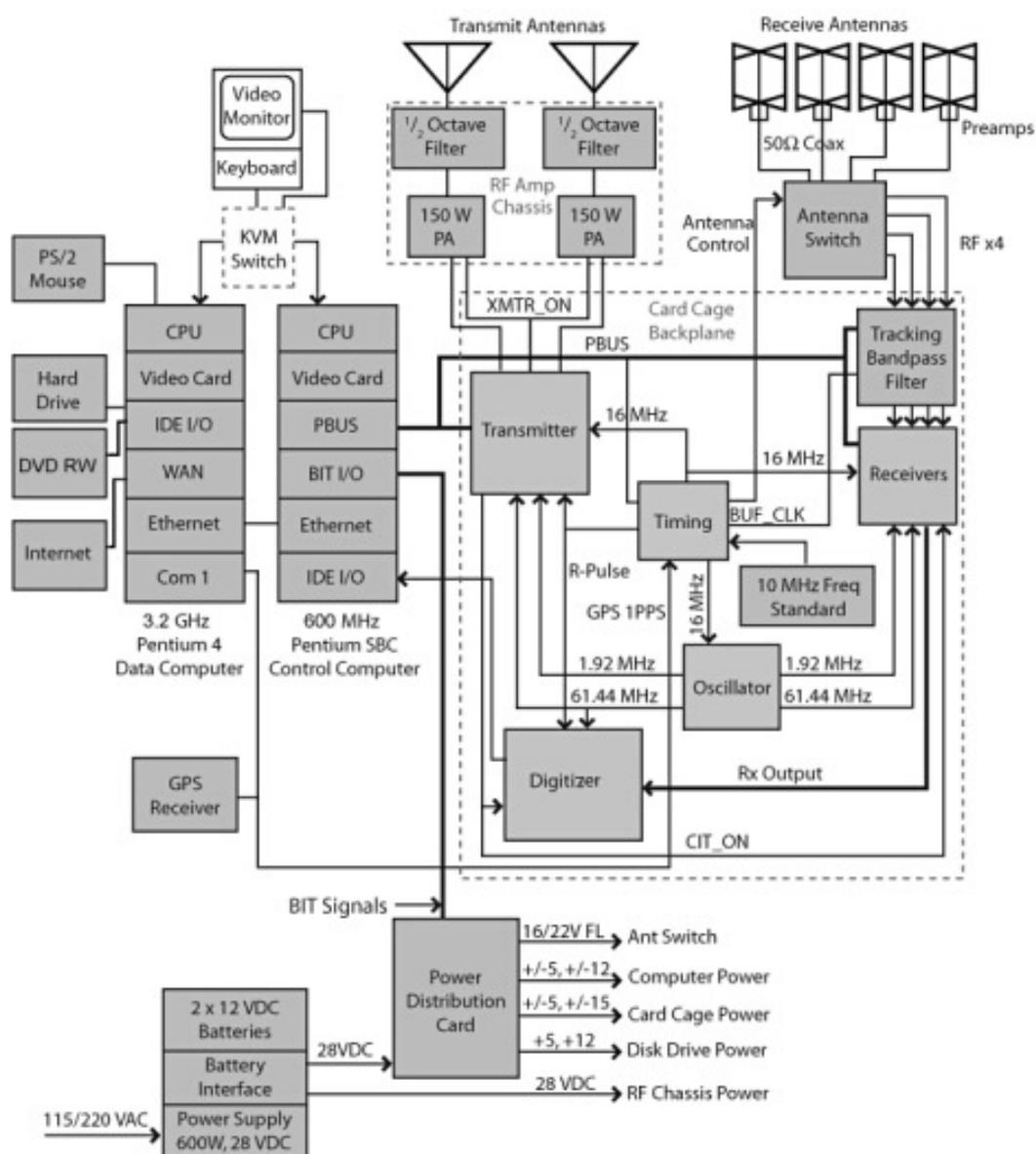
- Dois computadores (principal e auxiliar);
- Processador de sinal de digital;
- Controlador do sincronismo;
- Osciladores coerentes de fase e geradores do pulso;
- Oscilador de cristal (frequência mestra padrão);
- Sintetizador digital direto;
- Transmissor e excitador;
- Filtros de rastreamento ("sintonizadores");
- Receptores;
- Conversores de potência e distribuição;
- Antena Switch;
- Digitalizador;
- Duas unidades de disquete de 3,5 "1,44 Mbytes;
- Unidade de disco rígido de 40 Gbytes;
- ROM flash de 4 Mbytes e dois ventiladores axiais.
- Unidade *timing*

O chassi do amplificador de potência (inferior) contém os seguintes conjuntos:

- Dois amplificadores de 100W de estado sólido;
- Duas placas de filtro de 1/8 para supressão harmônica;
- Relé de limitação de corrente e dois ventiladores axiais.

A figura 3.8 demonstra o diagrama de blocos dos componentes da digissonda DPS – 4. Através desse diagrama, pode-se traçar o ciclo de funcionamento partindo da transmissão de ondas de rádio frequência até a recepção dessa mesma onda com o armazenamento dos dados gerados. Nas próximas seções será explicado de maneira detalhada o funcionamento do equipamento.

Figura 3.8: Diagrama de blocos da digissonda de modelo DSP-4.



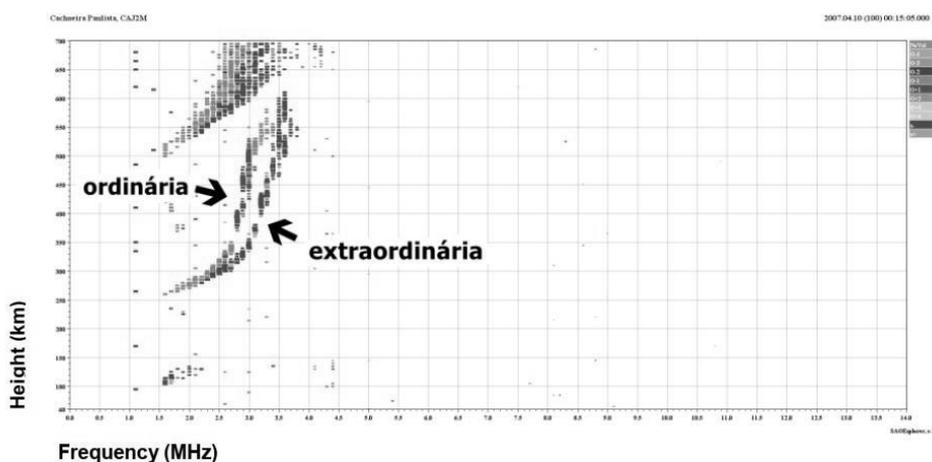
Fonte: LDI, (2009).

### 3.3 Dados de Digissonda

A digissonda fornece gráficos de altura por frequência chamados de ionogramas composto por traços adequadamente organizados a partir do eco refletido pelas camadas ionosféricas. Através desses gráficos, pode-se analisar o perfil das regiões ionosféricas (a partir da região E) e também o comportamento dela diante de algum evento que interfere neste meio. Os ionogramas também podem mostrar o estado de polarização do sinal recebido correspondendo as componentes ordinárias (linha rosa de polarização linear) e extraordinário

(linha verde de polarização não linear). Essas componentes são resultados do campo magnético fazendo com que a onda seja em duas frequências diferentes (birrefringente) (JESUS, 2008). A figura 3.9 representa um ionograma com os traços ordinário e extraordinário da região F.

Figura 3.9: Ionograma do dia 10 de abril de 2007 à 0015 UT para a estação de Cachoeira Paulista que mostra o perfil das componentes ordinárias e extraordinárias.

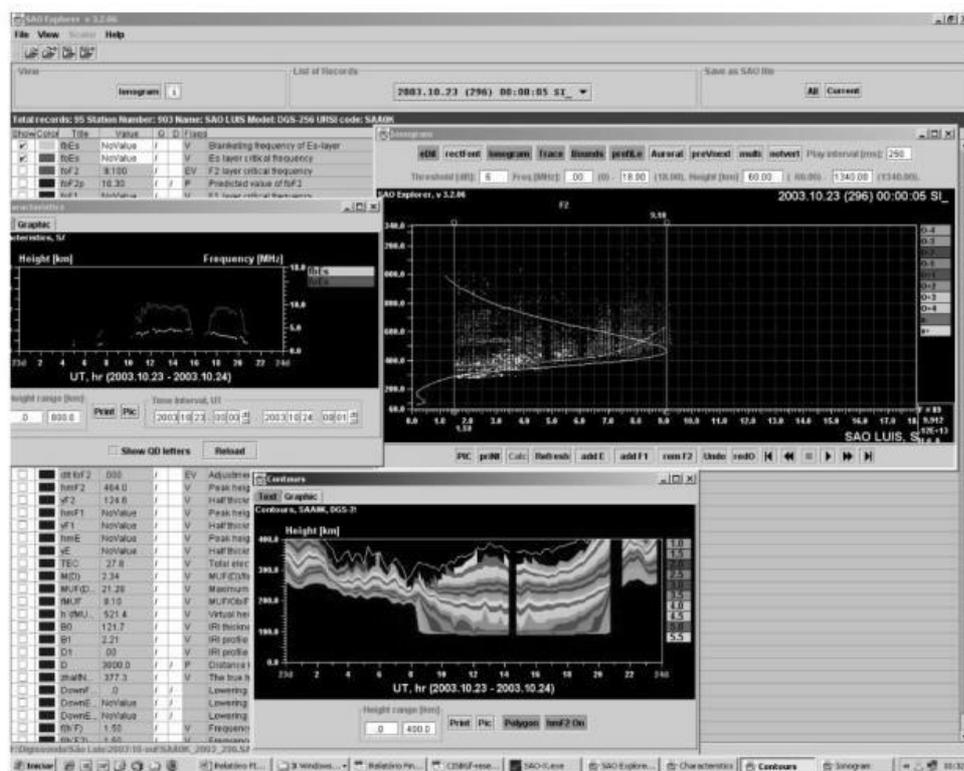


Fonte: Autoria própria.

Esses dados são coletados através do intervalo de tempo definido pelo o operador e possui formato de arquivos denominados de GRM, RSF, MMM. Através desse formato, podemos obter a interpretação automática dos perfis ionosféricos pela coleção de programas presente no *Artist (Automatic Real-Time Ionogram Scaler with Truehigh)*. O *Artist* é capaz de fornecer parâmetros ionosféricos em relação à altura como por exemplo  $hmF2$ ,  $h'F$ ,  $h'E$ ,  $h'Es$ , em relação a frequência  $foF2$ ,  $foF1$ ,  $foEs$  e em relação a fatores de propagação oblíquo (Bertoni, 2004).

Para a leitura dos gráficos utiliza-se o programa SAO-X. Esse programa possibilita a manipulação dos parâmetros pré-definidos pelo *Artist*, tornando possível também a exportação dos valores obtidos dos parâmetros por bloco de notas para uso nas análises do comportamento ionosférico. A figura 3.10 apresenta o *layout* do programa.

Figura 3.10: Layout do programa SAO-X com demonstração de algumas ferramentas para monitoramento da ionosfera.



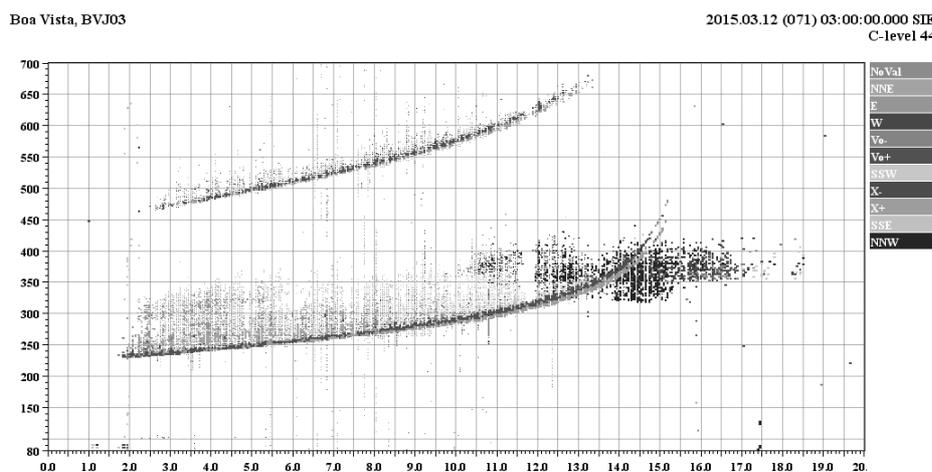
Fonte: Resende, (2008).

## CAPÍTULO IV – Resultados I – Estudo da influência das irregularidades nos dados de digissonda.

Este capítulo apresenta os resultados obtidos na análise da digissonda e dos dados gerados por ela sob influência das irregularidades ionosféricas como as Bolhas de Plasma, CEJ e Cisalhamento de Ventos, respectivamente. Os dados de digissonda foram obtidos através da rede EMBRACE.

Na ocorrência de Bolhas Ionosféricas, percebe-se um grande espalhamento da região F no âmbito de altura e frequência que não possui um traçado característico. O ionograma da figura 4.1 mostra o comportamento dos sinais emitidos pela digissonda no momento em que se passa uma bolha de plasma na região de Boa Vista no dia 12 de março de 2015 às 0300 UT. Nesse instante, as ondas de rádio passam a ser refletida em várias frequências e alturas, justificando o espalhamento no gráfico.

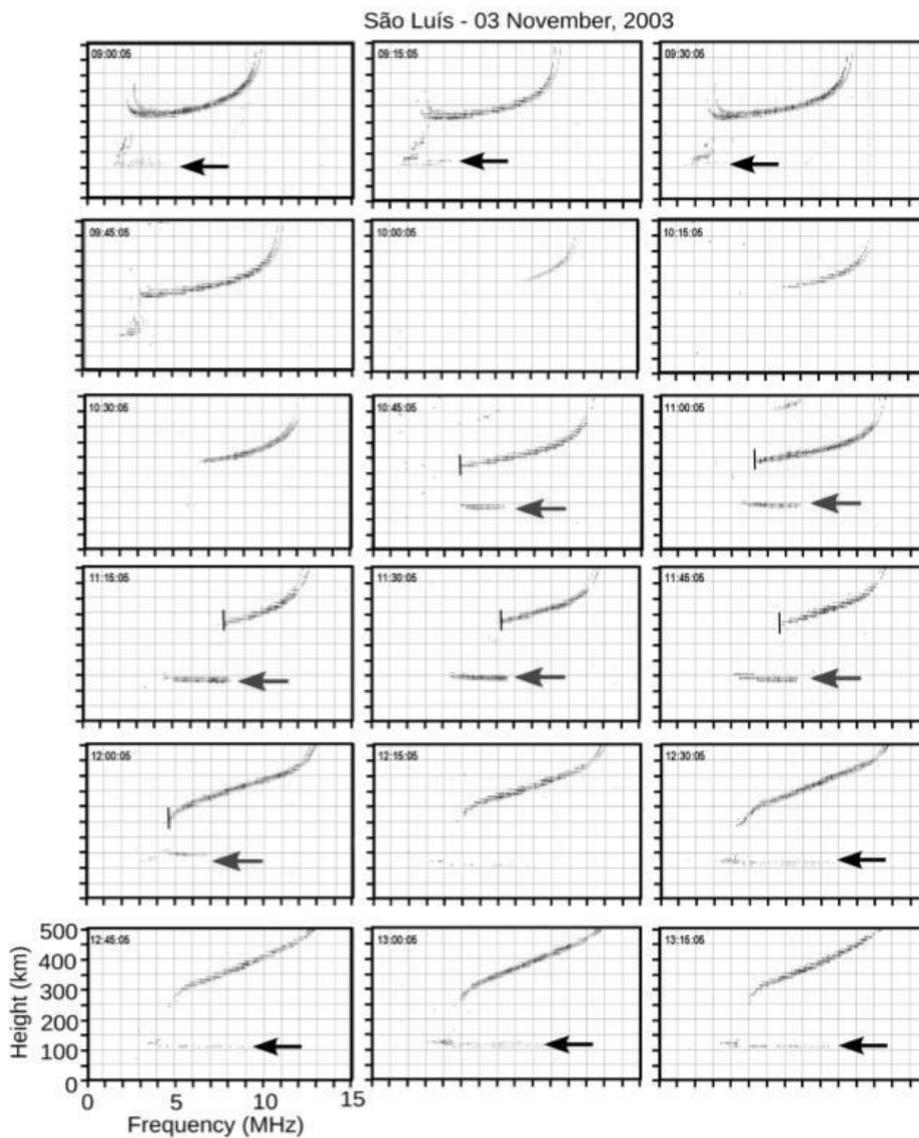
Figura 4.1: Ionograma da região de Boa Vista no dia 12 de março de 2015 às 0300 UT.



Fonte: EMBRACE, (2015).

Nas regiões de equador magnético é comum a ocorrência do fenômeno de Eletrojato Equatorial. Devido aos processos dinâmicos da região equatorial, nessa região são formadas as camadas *Esq*. Essas camadas tem como características o não bloqueio do sinal emitido pela digissonda para as regiões superiores. Quando ocorre o CEJ, as camadas do tipo q desaparecem e o sinal passa a ser bloqueado pela região E. A figura 4.2 mostra um conjunto de ionogramas da região de São Luís no momento em que ocorre o evento de CEJ. Nas figuras, é possível perceber que minutos antes do evento se tem o aparecimento das camadas *Esq*.

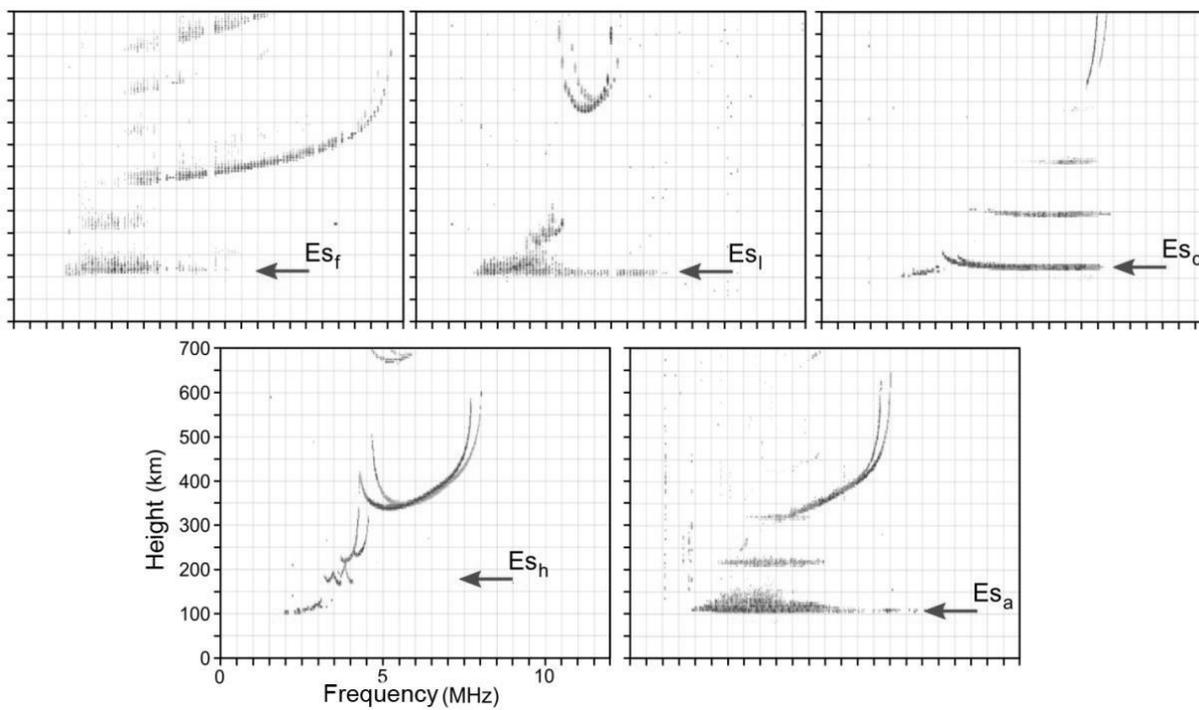
Figura 4.2: Sequência de ionogramas da região de São Luís no dia 03 de novembro de 2003 das 0900 UT às 1315 UT.



Fonte: Denardini, (2016).

Quando ocorre o cisalhamento de ventos, o acúmulo de íons e elétrons causados por esse fenômeno costumam ficar alocados na região E. Os gráficos de Es com padrões de camadas do tipo *f*, *l*, *c* e *h* podem ser característicos desse fenômeno. Os ionogramas da figura 4.3 ilustram as camadas descritas acima.

Figura 4.3: Tipos de camadas Es mais comuns em baixas e médias latitudes vistas pela a estação de Cachoeira Paulista – SP.



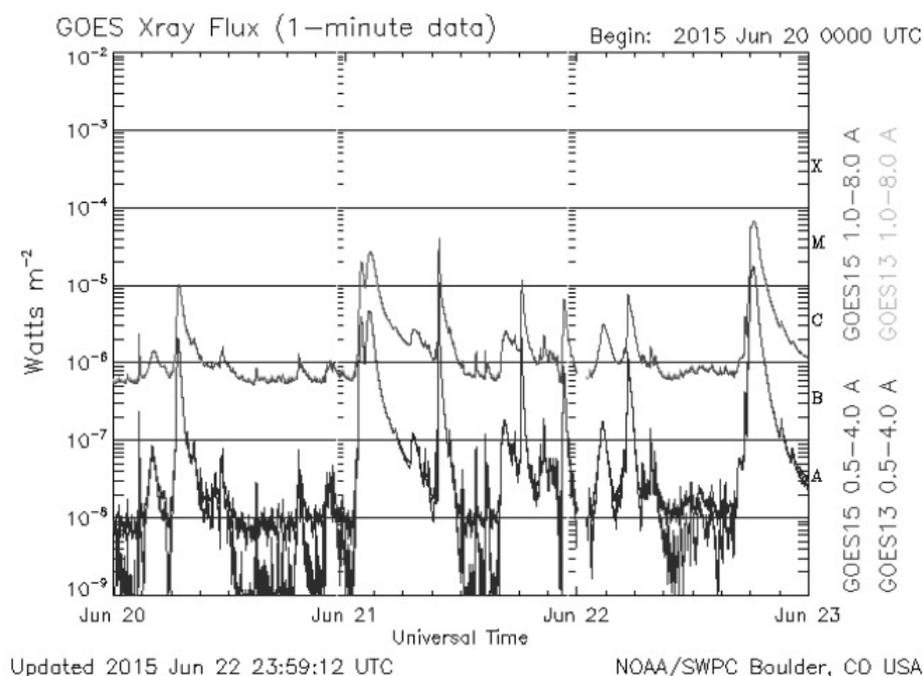
Fonte: Autoria própria.

## CAPÍTULO V – Resultados II – Estudo de caso da influência do flare solar nos dados de digissonda.

Neste capítulo será apresentado os resultados obtidos da análise do flare solar que ocorreu no dia 22 de junho de 2015 às 1800 UT com classe de M6.5  $W/m^2$  para as regiões de Boa Vista, São Luís e Cachoeira Paulista.

A figura 5.1 foi obtida através do satélite GOES e mostra o fluxo de Raios-X que comprovam a ocorrência do evento. A linha de vermelha da figura mostra que a magnitude do flare chegou a atingir o máximo de M6.5  $Watts/m^2$ . Junto da análise de outros parâmetros como, velocidade do vento solar, componente vertical do campo magnético terrestre e índice magnético Dst, foi comprovado que o fenômeno foi associado a uma ejeção de massa coronal (CME).

Figura 5.1: Fluxo de Raios-X para o dia 22 de junho de 2015.

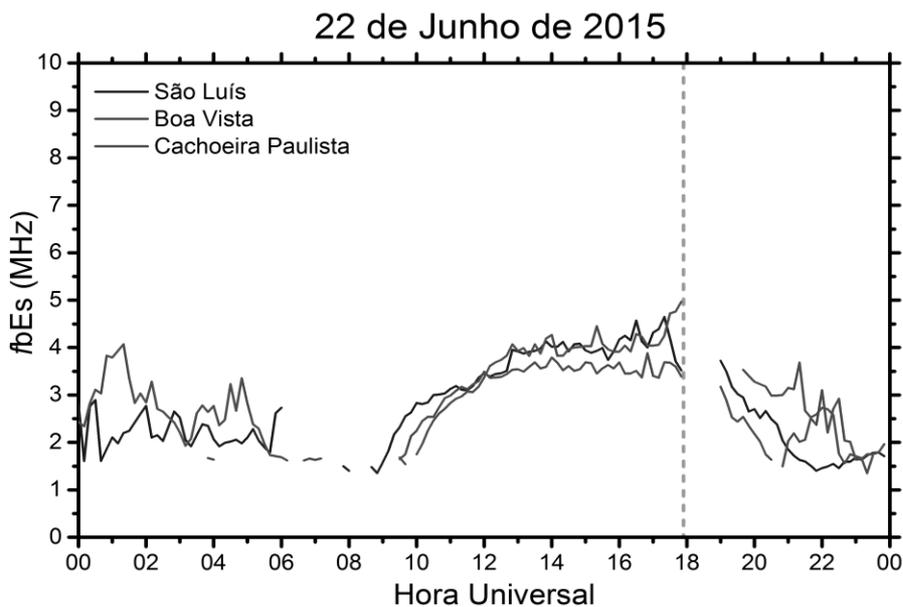


Fonte: GOES, (2015).

Assim que constatado as informações relacionadas ao flare, foram feitas análises dos ionogramas para as regiões de Boa Vista, Cachoeira Paulista e São Luís durante a explosão solar afim de entender o comportamento da propagação das ondas de rádio e da comunicação sob esse efeito. Os parâmetros utilizados para isso foram o  $f_bEs$  (frequência máxima de bloqueio da camada Es) e  $f_{min}F$  (frequência mínima de bloqueio da região F). Na figura 5.2

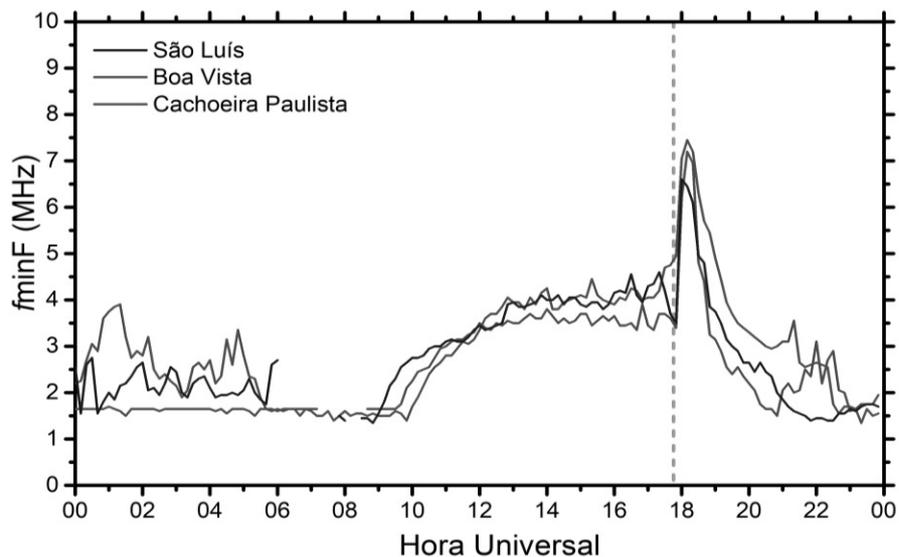
observa-se que o parâmetro  $fbEs$  desaparece às 1800 UT nas três regiões observadas. A figura 5.3 mostra o comportamento do parâmetro  $fminF$  durante a explosão. Nesse contexto, foi possível observar um pico para as três regiões também às 1800 UT.

Figura 5.2: Parâmetro  $fbEs$  para as três regiões de estudo em 22 de junho de 2015.



Fonte: Autoria própria.

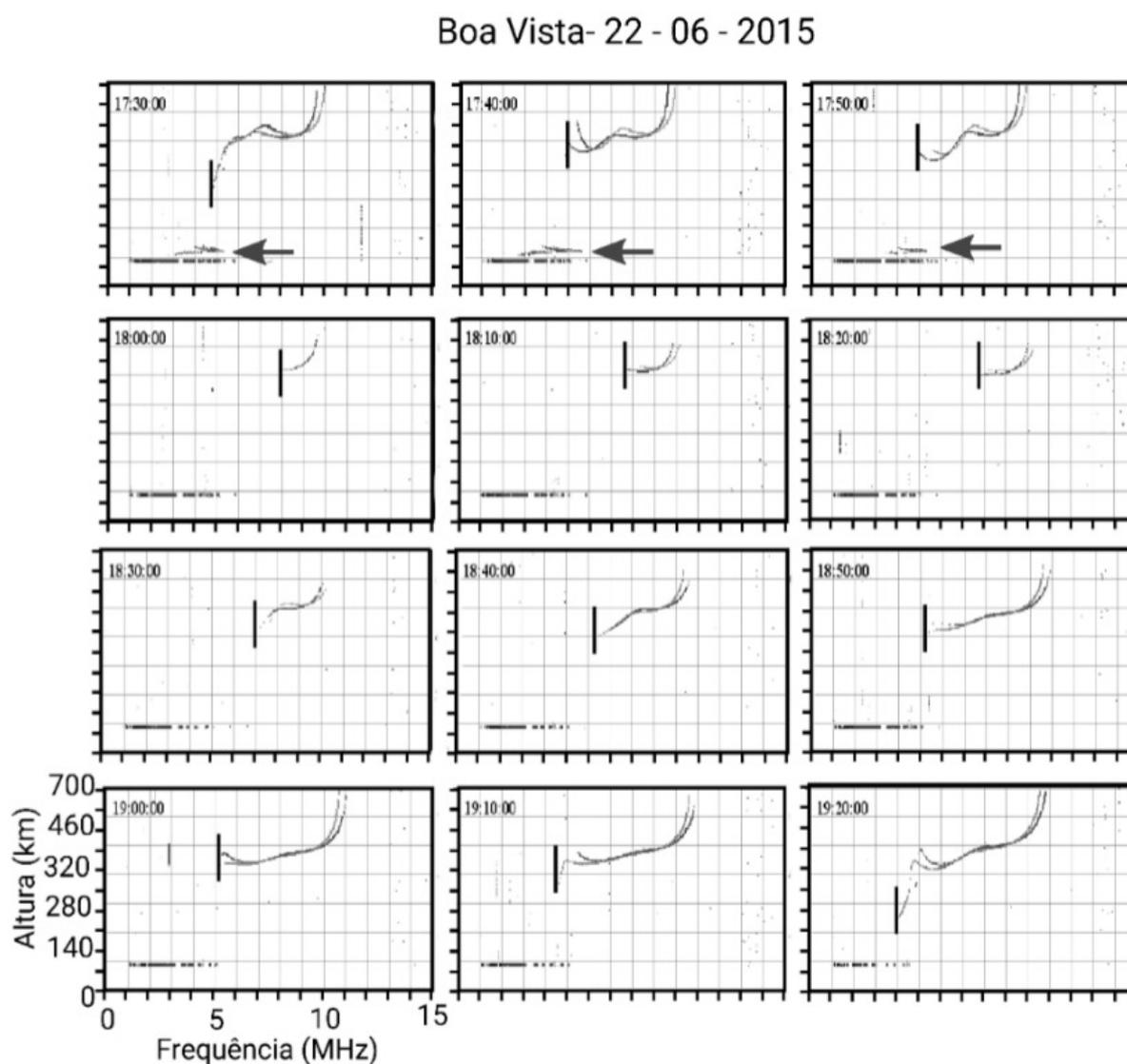
Figura 5.3: Parâmetro  $fminF$  para as três regiões de estudo em 22 de junho de 2015.



Fonte: Autoria própria.

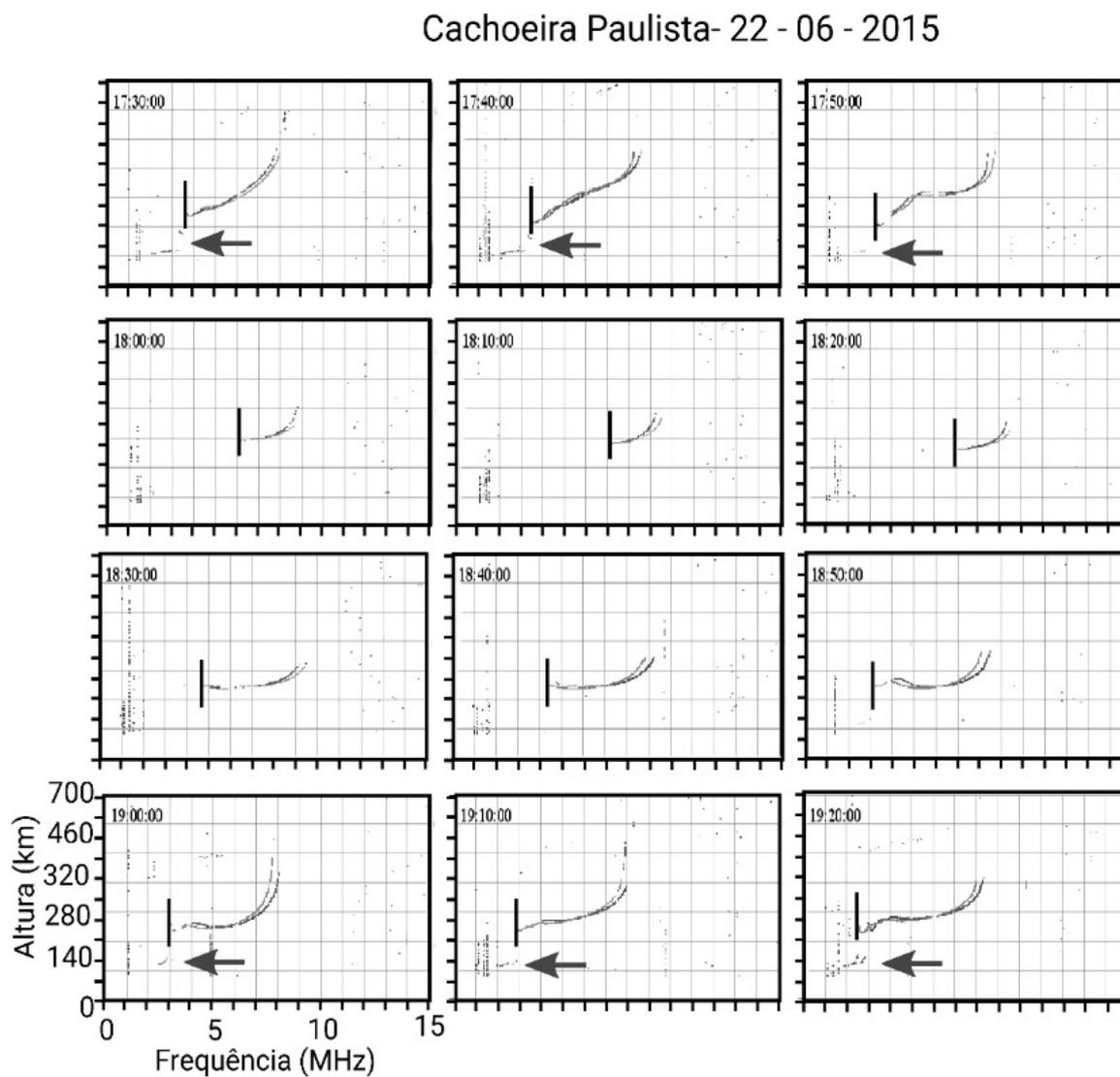
Analisando os ionogramas, foi possível observar um desaparecimento de parte do perfil ionosférico para as três regiões. A figura 5.4 mostra os ionogramas durante o evento para a região de Boa Vista. A figura 5.5, apresenta os ionogramas da região de Cachoeira Paulista e a figura 5.6 expõe a região de São Luís. A seta vermelha nas figuras aponta para região E ainda presente antes do flare. A linha preta, marca o início da região F nos gráficos. Durante a explosão, a região E desaparece e é possível observar apenas um pequeno pedaço da região F.

Figura 5.4: Ionogramas da região de Boa Vista no dia 22 de junho de 2015.



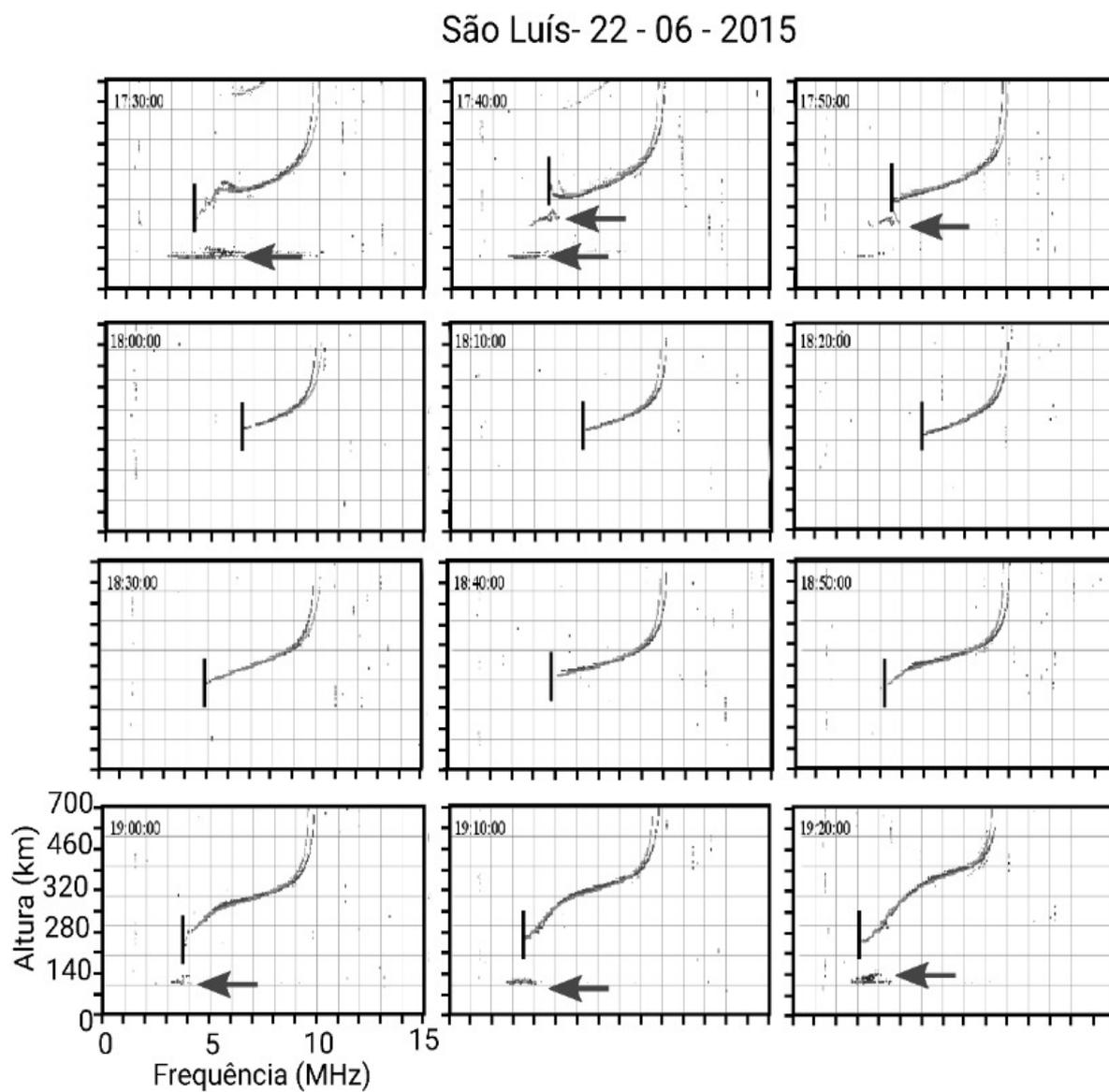
Fonte: Autoria própria.

Figura 5.5: Ionogramas da região de Cachoeira Paulista no dia 22 de junho de 2015.



Fonte: Autoria própria.

Figura 5.6: Ionogramas da região de São Luís no dia 22 de junho de 2015.



Fonte: Autoria própria.

## CONCLUSÕES

Todos os estudos e ionogramas mostrados balizam a capacidade de influência dos mais diversos fatores atenuantes dos sinais de rádio frequência, que são passíveis de análise com as interpretações dos parâmetros ionosféricos gerados pelas digissondas. Essa análise permite visualizar as alterações de informação e comunicação neste meio de transmissão de sinal, sendo possível determinar o comportamento dos sinais em meio ionosférico.

Através do ionograma apresentado nos capítulos anteriores, quando há a ocorrência de Bolhas Ionosféricas é perceptível as várias reflexões das ondas de rádio que denominamos de espalhamento da região F. Isso ocorre devido a esses sinais sofrerem saturação que prejudicam na comunicação. Nas regiões de equador magnético, o esperado é que as ondas de rádio transmitidas não sejam bloqueadas pelas camadas Es do tipo  $q$ . No entanto, no período noturno há inversão das derivas de irregularidades na região ionosféricas e as ondas de rádio passam a ser bloqueadas em alturas menores, na região E. O mecanismo de cisalhamento de ventos faz que haja aumento da densidade eletrônica na região capazes de formar as camadas Es. Com a formação delas, os sinais emitidos pela digissonda podem ser bloqueados em frequências maiores e alturas menores.

A fim de mostrar a interação entre um evento solar e a interferência nos dados provenientes da digissonda, foi estudado o evento de flare solar do dia 22 de junho de 2015 de classe M6.5  $W/m^2$ . Os ionogramas das regiões de Boa Vista, Cachoeira Paulista e São Luís mostram que o evento é capaz de atingir tanto a região E quanto a região F. Pode-se verificar que o parâmetro  $f_bEs$  desaparece enquanto que o parâmetro  $f_{min}F$  tem pico expressivo para as três regiões no mesmo horário em que o flare é detectado pelo o satélite GOES. Isso indica que a região E e parte da região F foram absorvidas. Com isso, pode-se concluir que as regiões equatoriais são as que mais sofrem interferência e a energia de um flare solar influência diretamente a região D ionosférica, ionizando-a e absorvendo o sinal das ondas de rádio e portanto, não observamos a região E e parte da região F nos ionogramas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDU, M. A.; MURALIKRISHNA, P.; BATISTA, I.S.; SOBRAL, J.H.A. Rocket observation of equatorial plasma bubbles over Natal, Brazil using a high-frequency capacitance probe. **Journal of Geophysical Research**, v. 96, n. A5, p. 7689-7695, 1991.

AMORIM, D. C. M., Caracterização de distúrbios ionosféricos propagantes na região de baixas latitudes no setor brasileiro associado á instabilidade plasma perkins gerada em médias latitudes, Dissertação (Mestrado – Geofísica Espacial) – Instituto de Pesquisa Espaciais, São José dos Campos, 2010.

ARANHA, S.L., Estudo de Ondas Planetárias na Ionosfera em Baixas Latitudes e Região Equatorial, Dissertação (Mestrado – Física e Astronomia) – Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos, 2006.

BATISTA, I. S.; ABDU, M. A.; MACDOUGALL, J.; SOUZA, J. R. Long term trends in the frequency of occurrence of the F-3 layer over Fortaleza, Brazil. **Journal of Atmospheric and Solar Terrestrial Physics**, v. 64, n. 12-14, p. 1409-1412, 2002.

BIBL, K., REINISCH B. W., KITROSSER, D. F., Digisonde 256 - General Description of the compact digital ionospheric sounder, First Edition, Universidade de Lowell, Lowell – MA – USA, 1981.

DAVIES, K. Ionospheric Radio Propagation. Nat. B. of Std. Monog 80, 1965.

DENARDINI, C., Desenvolvimento de um sistema de correção de fase para o radar ionosférico de São Luís do Maranhão, 137p. Dissertação (Mestrado – Ciência Espacial/ Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1999.

DENARDINI, C. M., Estudo da Eletrodinâmica da Ionosfera Equatorial Durante o Período de Máxima Atividade Solar (1999-2002). Tese (Doutorado – Geofísica Espacial) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2003.

FONSECA, F. J. B. AND SOUZA, C. F., Efeito das bolhas ionosféricas nas telecomunicações. 13 p. Dissertação (Iniciação Científica em telecomunicações) - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

HOOKE, W. H. Ionospheric response to internal gravity waves 2. Lower F-region response. **Journal of Geophysical Research**, v. 75, n.34, p. 519-525, 1970.

JESUS, R. Estudo de eventos do tempo espacial (—space weather) e a ocorrência de bolhas de plasma ionosféricas no setor brasileiro e japonês usando sondagem ionosférica. Dissertação (Mestrado – Física e Astronomia) – Universidade do Vale do Paraíba (UNIVAP), São José dos Campos – SP, 2008

KIRCHHOFF, V. W. J. H., *Introdução à geofísica espacial*. São Paulo: Nova Stella, EDUSP, 1991.

LDI. **Lowell Digisonde International, LLC**. 2017. Acesso em: 17 de agosto de 2019. Disponível em: <<http://digisonde.com>>. 42, 43

LANCHESTER, B. S.; NYGREN, T.; HUSKOMEN, A.; TURNEN, T.; JARVIS, M. J., Sporadic e as trace of atmospheric gravity waves. **Planet Space Science**, v. 39, n. 10, p. 1421-1434, 2001.

RASTOGI, R. Equatorial sporadic and cross-field instability. **Annales Geophysic**, v. 28, n. 4, p.717-727, 1971.

RESENDE, L. C. A. Ocorrência de camadas E esporádicas em condições de eletrojato equatorial e contra eletrojato: teorias e observações. Dissertação (Exame de Qualificação – Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2012.

SALOMONI, C.S., GPS e Ionosfera: Estudo do comportamento do tec e de sua influência no posicionamento com GPS na região brasileira em períodos de alta e baixa atividade solar.

Dissertação (Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

SANTANA, D. C., Estudos da evolução temporal/espacial das derivas das depleções do plasma ionosférico por imagens digitais da aeroluminescência OI 630 nm noturna..Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2001.

SARMENTO, C., Introdução a Ionosfera, disponível:

[http://www.sarmeto.eng.br/Ionosfera.htm#A\\_IONOSFERA](http://www.sarmeto.eng.br/Ionosfera.htm#A_IONOSFERA), acesso: agosto, 2019.

SILVA, M. E. D., Estudo da espessura equivalente ionosférica durante um ano de baixa atividade solar. Dissertação (Mestrado em Física e Astronomia) - Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos, 2013.

STENSMANN, B. H. W., UFRGS (online), disponível:

[http://www.if.ufrgs.br/mpef/mef008/mef008\\_02/Berenice/aula4.html](http://www.if.ufrgs.br/mpef/mef008/mef008_02/Berenice/aula4.html), acesso: agosto, 2019.

WHITEHEAD, J. Recent work in mid-latitude and equatorial Sporadic-E. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v.15, n.5, p.401-424, 1989.