

**ESTUDO DA ELETRODINÂMICA DA REGIÃO E
IONOSFÉRICA BASEADO EM DADOS DE
SONDADORES DIGITAIS E MODELAGEM NUMÉRICA
PARA APLICAÇÃO NO MONITORAMENTO E
PREVISÃO DO CLIMA ESPACIAL**

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

Thainá de Oliveira Bertolotto (Unitau, Bolsista PIBIC/CNPq)

E-mail: thaina.bertolotto@inpe.br

Dr. Clezio Marcos De Nardin (DIDAE/CGCEA/INPE, Orientador)

E-mail: clezio.denardin@inpe.br

COLABORADOR

Dra. Láysa Cristina Araujo Resende Chagas (DIDAE/INPE)

Julho de 2018

ESTUDO DA ELETRODINÂMICA DA REGIÃO E IONOSFÉRICA BASEADA EM DADOS DE SONDADORES DIGITAIS E MODELAGEM NUMÉRICA PARA APLICAÇÃO NO MONITORAMENTO E PREVISÃO DO CLIMA ESPACIAL

Thainá de Oliveira Bertolotto

Iniciação Científica em
Geofísica Espacial, orientada
pelo Dr. Clezio Marcos De
Nardin e Coorientada pela
Dra. Laysa C. A. Resende
Chagas.

INPE

São José dos Campos

2018

DADOS DE IDENTIFICAÇÃO

Bolsista:

Thainá de Oliveira Bertolotto

Curso: Engenharia Elétrica e Eletrônica

UNITAU – Universidade de Taubaté

Orientador:

Dr. Clezio Marcos De Nardin

Divisão de Aeronomia - DIDAE/CGCEA/INPE – MCT

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE/MCT

São José dos Campos – SP

Colaborador:

Dra. Laysa Cristina Araújo Resende - DIDAE/CGCEA/INPE – MCT

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE/MCT

São José dos Campos – SP

Local de Trabalho/Execução do Projeto:

O projeto foi desenvolvido na Divisão de Aeronomia (DIDAE) da Área de Ciências Espaciais e Atmosféricas (CGCEA) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), sob a orientação do Dr. Clezio Marcos De Nardin, pesquisador da divisão e co-orientação da Dra. Láysa Cristina Araujo Resende Chagas.

ESTUDO DA ELETRODINÂMICA DA REGIÃO E IONOSFÉRICA BASEADA EM DADOS DE SONDADORES DIGITAIS E MODELAGEM NUMÉRICA PARA APLICAÇÃO NO MONITORAMENTO E PREVISÃO DO CLIMA ESPACIAL

Thainá de Oliveira Bertolotto

Iniciação Científica em
Geofísica Espacial, orientada
pelo Dr. Clezio Marcos De
Nardin e Coorientada pela
Dra. Laysa C. A. Resende
Chagas.

INPE

São José dos Campos

2018

AGRADECIMENTOS

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE pela oportunidade de estudos e utilização de suas instalações.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, pelo auxílio financeiro.

A Deus, pela vida.

Ao meu orientador Dr. Clezio Marcos De Nardin e minha Co-orientadora Dra Laysa C. A. Resende Chagas, por todo o apoio, dedicação, conselhos e compreensão a fim de realizar um bom trabalho.

Ao grupo Apoena pelo apoio, pelos conselhos e pela convivência.

A minha família, pelo carinho e presença de todos os dias.

Aos meus amigos de trabalho que contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho.

“Inutilia Truncat”
António Dinis e Silva

RESUMO

A região E ionosférica está localizada entre 90 e 130 km de altitude, no qual ocorrem adensamentos de plasma denominados de camadas E-esporádicas (Es). Estas camadas Es são diferenciáveis de acordo com a sua formação, morfologia no ionograma, altitude e latitude de onde são observadas. Assim, elas são classificadas em letras minúsculas como l, f, c, h, a, e q. Contudo, os ionogramas dessas camadas podem ser afetados por eventos externos como os flares solares. Os flares solares são filamentos carregados de Raios-X que se desprendem do Sol em direção a Terra. Eles são detectados através do satélite GOES (Geostationary Operational Environmental Satellites) e pode ser dividido de acordo com sua intensidade em A, B, C, M e X, sendo M e X os mais intensos. Quando os flares solares mais intensos entram em contato com a ionosfera, as ondas de rádio na faixa de HF são absorvidas resultando no fenômeno denominado de “*blackout*”. Portanto, neste trabalho será apresentada uma análise quantitativa do tempo em que um flare solar (de classe M ou X) leva para influenciar a ionosfera causando os *blackouts*. Além disso, será mostrado o nível de influência dos flares solares nas camadas Es ionosféricas para as de Boa Vista – RR (02° 49’ N, 60° 40’ O), São Luís – MA (2° 31’ S, 44° 16’ O) e Cachoeira Paulista – SP (22° 39’ S, 45° 00’ O) no período de 2015. Para complementar este trabalho, será apresentado um estudo de caso desta interação para as regiões brasileiras mencionadas acima.

Sumário

INTRODUÇÃO.....	8
CAPÍTULO 1 – REVISÃO TEÓRICA.....	9
1.1 Sondagem -Universal	9
1.2 Técnicas Experimentais.....	11
1.2.1 A Ionossonda.....	11
1.2.1.1 O Gravador Virtual de Altura-Tempo	16
1.2.1.2 Medidas de Absorção	16
1.2.1.3 O Método de Reflexão do Pulso.....	16
1.2.1.4 Gravações de Intensidade de Campo de Onda Contínua.....	18
1.2.2 Método do Riômetro.....	18
1.2.2.1 Observações de Frequência Mínima.....	21
1.2.3 Medidas de Fase	21
1.2.3.1 Mudança do Período Relativo	21
1.2.3.2 Alterações de Frequências	21
1.2.4 Ângulo de Chegada	22
1.2.4.1 Direção	22
1.2.4.2 Ângulo Vertical	22
CAPÍTULO 2 – INSTRUMENTAÇÃO	24
2.1 Digissonda DPS.....	24
2.1.1 Dados fornecidos pela Digissonda	25
2.2 Satélite GOES.....	26
CAPÍTULO 3 – ESTUDO DA INFLUÊNCIA DE UM FLARE SOLAR NA IONOSFERA.....	28
3.1 Interação entre o Flare Solar e a Ionosfera Brasileira	32
CAPÍTULO 4 – ESTUDO CLIMATOLÓGICO SOBRE A INFLUÊNCIA DO FLARE SOLAR NA IONOSFERA BRASILEIRA	34
4.1 Seleção de Dados.....	34
4.2 Influência na Ionosfera dos Flares de Classes M e X.....	35
CONCLUSÃO.....	46
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48

Lista de Figuras

Figura 1.1: Mapa da distribuição global das estações de sondagens até o ano de 1961.	10
Figura 1.2: Diagrama de bloco de uma ionosonda típica.....	12
Figura 1.3 a: Tipos de exibição da ionosonda – Varredura A.....	14
Figura 1.3 b: Tipos de exibição da ionosonda – Varredura B.....	14
Figura 1.3 c: Tipos de exibição de ionosonda – Panorâmica.	15
Figura 1.4: Diagrama de blocos do riômetro.....	19
Figura 1.5: As variações de frequência da WWV-20 recebidas em Boulder, Colo., durante um flare solar em 12 de novembro de 1960.	23
Figura 2.1: Computadores da digissonda do modelo DPS instalada em São Luís.....	24
Figura 2.2: (a) antena transmissora; (b) antena receptora do tipo delta; (c) sistema de controle, pré-processamento e transmissão de dados.	25
Figura 2.3: Ionograma do ano de 2015 para a região de São Luís mostrando os parâmetros $fminF$, $fbEs$ e polarização.....	26
Figura 3.1: Parâmetro $fbEs$ e $fminF$ para as três regiões de estudo em 22 de Junho de 2015	29
Figura 3.2: Ionograma para a região de Boa Vista em 22 de junho de 2015.	30
Figura 3.3: Ionograma para a região de São Luís em 22 de junho de 2015.....	31
Figura 3.4: Ionograma para a região de Cachoeira Paulista em 22 de junho de 2015. .	32
Figura 3.5: Análise do tempo de interação entre flare solar e ionosfera utilizando os parâmetros $fbEs$ e $fminF$ para Boa Vista (linha verde), São Luís (linha azul) e Cachoeira Paulista (linha vermelha).	33
Figura 4.1: Análise do tempo de interação entre flare solar e ionosfera utilizando os parâmetros $fbEs$ e $fminF$ para Boa Vista (linha verde), São Luís (linha azul) e Cachoeira Paulista (linha vermelha).	35

INTRODUÇÃO

As camadas esporádicas (Es) se caracteriza por ser uma região de alta densidade eletrônica localizada entre 90 e 130 km (Layzer, 1972, Whitehead, 1989). Essas camadas Es são compostas de íons metálicos (como Mg^+ , Si^+ , Fe^+ , Ca^+ , Na^+) e são caracterizadas pela suas variabilidades que dependem da altura e latitude de onde são observadas. Elas são classificadas em diferentes tipos como “q” (equatorial), “a”(auroral), “c” (cusp), “h” (high) e “l”(low)/”f”(flat), de acordo com a região do globo onde são detectadas (equatorial, média latitude e auroral) e de acordo com as suas características nos ionogramas (Piggot and Rawer, 1972). As camadas Es_q são transparentes as ondas de rádio e estão diretamente associadas a irregularidades do plasma do Eletrojato Equatorial (EEJ) (Forbes, 1981). Os outros tipos de camadas são formados devido ao cisalhamento de ventos causado por ventos horizontais em direções opostas, geralmente os ventos de marés (Haldoupis, 2011).

Além disso, flares solares, filamentos altamente carregados energeticamente em forma de radiação eletromagnética, interferem diretamente na região D ionosférica uma vez que a radiação é nas proximidades da banda do extremo ultravioleta (EUV) e dos Raios-X. O fenômeno mais conhecido é o Distúrbio Ionosférico Súbito (SID). O resultado do SID é um rápido aumento na absorção das ondas de rádio, que pode ser observado como a ausência das regiões E e F bem como as camadas Es nos ionogramas uma vez que é mais intenso na faixa das Altas Frequências (HF) (Sahai et al., 2007, Resende, 2010). Nesse contexto, foi realizada uma análise quantitativa do tempo de resposta entre flare solares e a ionosfera para o ano de 2015. As regiões estudadas foram Boa Vista – RR (02° 49’ N, 60° 40’ O), São Luís – MA (2° 31’ S, 44° 16’ O) e Cachoeira Paulista – SP (22° 39’ S, 45° 00’ O). Além disso, foi feito um estudo de caso de um flare de classe M para o dia 22 de junho de 2015 nestas três regiões ionosféricas brasileiras.

CAPÍTULO 1 – REVISÃO TEÓRICA

1.1 Sondagem -Universal

A fim de se proporcionar comunicação de ondas de rádio é necessário ter informações sobre a ionosfera em escala global. Uma vez que as variações espaciais e temporais na ionosfera são amplas, a cobertura geográfica pode se tornar mais importante do que a precisão de medida da ionosfera em si. Este ponto deve ser considerado em relação aos dados ionosféricos uma vez que, por exemplo, a falta de precisão para a qual uma frequência crítica pode ser medida pode ser de pouco valor para os cientistas, mas pode ter um grande valor para os operadores de rádio.

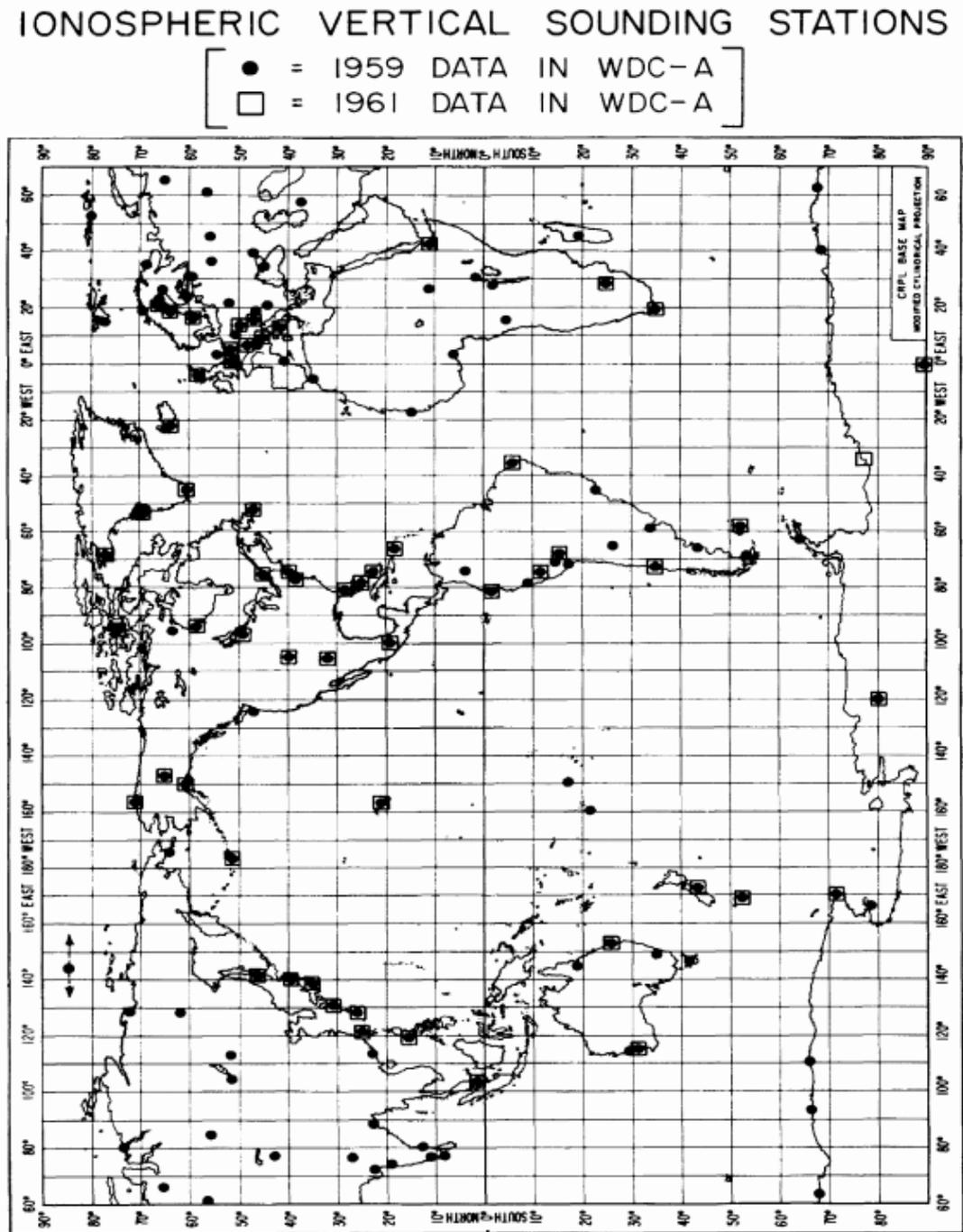
Antes da Segunda Guerra Mundial, havia a existência de poucas estações de sondagens. Eram elas:

- Slough, Inglaterra;
- Washington, D.C., Estados Unidos;
- Huancayo, Peru;
- Watheroo, Austrália;
- Slutsk, U.S.S.R. (União Soviética).

A necessidade de comunicação em grandes frequências confiáveis (*high frequency*) conduziu a instalações de várias outras estações durante a Segunda Guerra (em torno de 40 ou 50 estações). Durante o Ano Internacional da Geofísica (IGY- *International Geophysical Year*) foram instaladas ainda mais estações, chegando num total de, aproximadamente, 150 estações. A distribuição das estações durante o IGY é mostrado na Figura 1.1. Durante este último evento, foi introduzido uma uniformidade considerável na ampliação e divulgação de dados ionosféricos que se revelaram valiosos para o ponto de vista do comunicador de rádio até o ponto de vista do cientista.

Um grande impulso para as pesquisas ionosféricas veio de certas organizações internacionais como a União Internacional de Rádio Científica (URSI - *International Scientific Radio Union*) e o Comitê sobre Rádio de Ionosfera (CCIR – *Consultative Committee on Ionosphere Radio*). Essas organizações encorajaram as investigações dentro das variações espaciais e temporais, na distribuição dos elétrons na ionosfera, medições da absorção das ondas de rádio na ionosfera, movimentos ionosféricos, ruído e a disseminação das ondas de rádio a partir das irregularidades ionosféricas.

Figura 1.1: Mapa da distribuição global das estações de sondagens até o ano de 1961.



Fonte: Davies, 1965

Ao fazer medições em um meio como a ionosfera é necessária distinguir entre os experimentos controlados, como aqueles que podem ser realizados em laboratório, e os que não são controlados. Com exceção de certas técnicas de modelagem envolvendo laboratório de plasma e micro-ondas, a pesquisa ionosférica deve ser realizada em seu próprio ambiente e, portanto, qualquer controle deve ser feito pelo usuário.

1.2 Técnicas Experimentais

Existem várias formas possíveis de classificação de técnicas de rádio para realizar a análise da ionosfera. Por exemplo, podemos dividir em técnicas de pulsos versus ondas contínuas (CW) ou para frequências fixas versus frequência de varredura ou em métodos intermitentes versus métodos contínuos, entre outros. No presente estudo, será abordada a técnica mais utilizada para medir a ionosfera (a ionossonda) e seguir para as menos usadas como as técnicas de medição de absorção, período, etc.

1.2.1 A Ionossonda

A ionossonda é essencialmente um dispositivo de pulsos de radar no qual a frequência pode variar de 1 Mc/s até acima de 25 Mc/s. Uma detalhada descrição sobre as ionossondas é dado por Wright, et al., (1957). O equipamento foi designado para medir diretamente o tempo t ocupado pelo pulso de ondas de rádio para viajar até a ionosfera e voltar, em função da frequência. Ou seja, mede o conjunto de altura h' da ionosfera, onde:

$$h' = \frac{1}{2}ct = 0.15t, \quad (1)$$

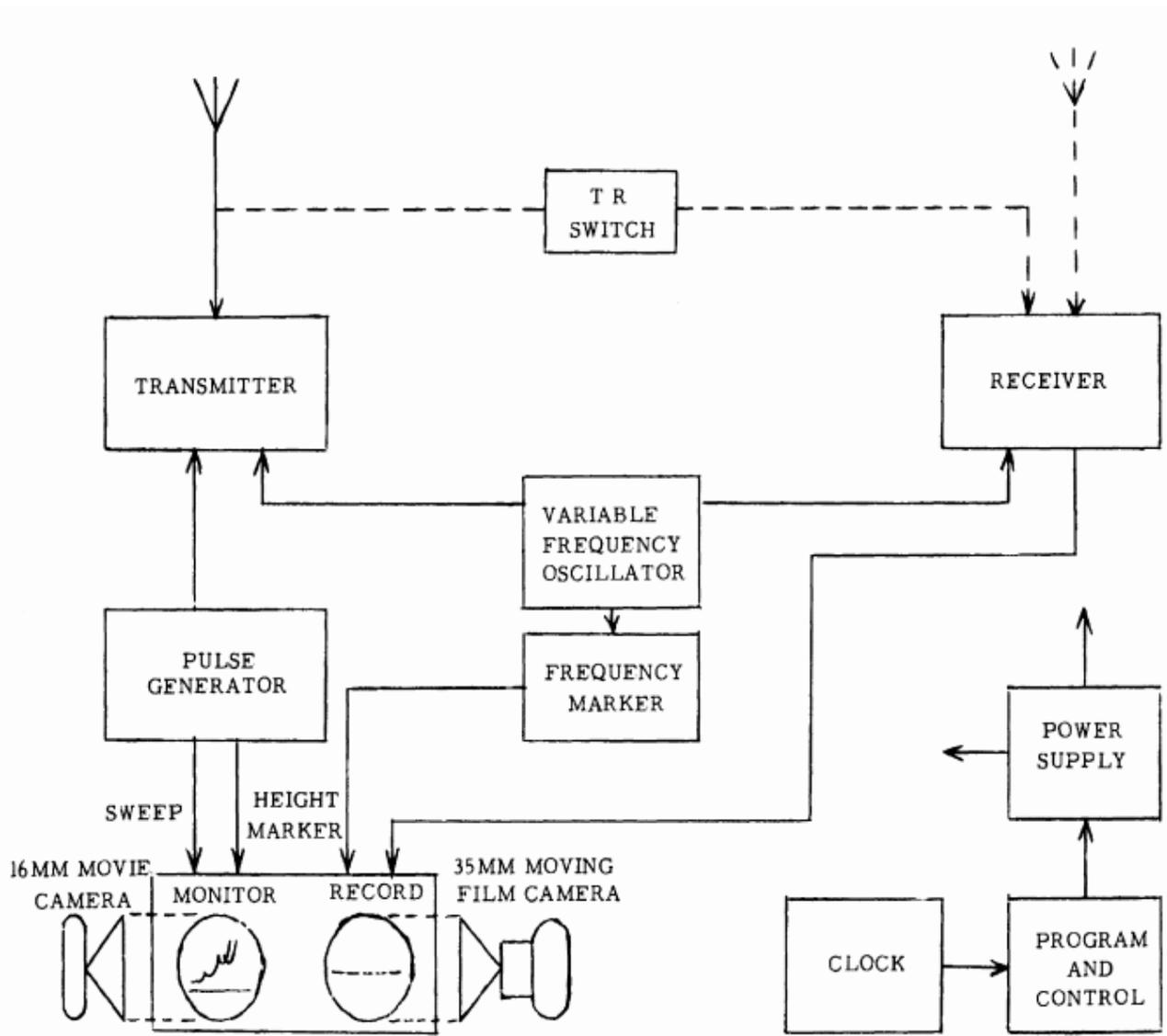
t está em microssegundos. Este conjunto de altura também é conhecido como altura equivalente ou altura virtual. O transmissor e o receptor são mantidos em sintonia por ligação eletrônica ou mecânica adequada e o sinal de saída do receptor é exibido em um osciloscópio de raios catódicos juntamente com marcadores de frequência e tempo (altura) adequados.

Estes sinais são geralmente aplicados sob forma de pulsos que varrem um traço a cada $\frac{1}{3}$, $\frac{2}{3}$, ou $6\frac{2}{3}$ msec 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.

Uma ionossonda que incorpora esses princípios é a NBS C-4 Ionosonde. Essencialmente, a ionossonda consiste em um transmissor de pulso (de pico de potência em cerca de 10 kW) e um receptor de banda larga como é mostrado no diagrama de blocos na Figura 1.2. O transmissor de pulso é composto de

- Um oscilador CW varrendo de 31 até 55 MHz;
- Um oscilador com pulsos em uma frequência de 30 MHz;
- Um misturador equilibrado produzindo a diferença de frequência dos dois (oscilador de frequência variável VFO e oscilador de frequência fixa FFO).
- Um amplificador de potência de banda larga do tipo com vídeo acoplado.

Figura 1.2: Diagrama de bloco de uma ionosonda típica



Fonte: Davies, 1965

A diferença entre as frequências variam em um fator de 25 a 1, embora a variação do oscilador de varredura seja inferior a 2 até 1. O receptor usa o mesmo oscilador com um 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 geralmente são deltas verticais ou verticais rômbricas que, apesar de possuírem impedância bastante constante e resistiva e não são muito eficientes na extremidade de baixa frequência da varredura. As antenas log periódicas são melhores a este respeito.

Um gerador de pulsos fornece pulsos para disparar o transmissor e a exibição (display) e emprega um cristal estável em 1,0 MHz juntamente com circuitos de divisão de frequência para obter as frequências de 3 kHz, dos quais, por moldagem adequada, obtêm-se os marcadores de altura de 50 km. Para 1500 Hz e 300 Hz produz 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.

Os tipos de exibição que são usados são classificados em:

Varredura A: É ilustrado na Figura 1.3a. A base de tempo do osciloscópio de raio catódico é sincronizada com a frequência de repetição do pulso do transmissor e um padrão de pulso estacionário é obtido. A base de tempo é aplicada às placas x e a saída do receptor é aplicada às placas y, juntamente com os marcadores de altura. Para a gravação fotográfica, uma tela é colocada na frente ao tubo. O movimento do filme após a fenda fornece a base de frequência. Conforme a frequência aumenta, o tempo de atraso geralmente aumenta e os pulsos na base de tempo se movimentam para a direita. Os excêntricos que controlam a frequência do transmissor e receptor são apropriadamente colocados de modo a dar a escala de frequências pretendida sobre a película (por exemplo, linear ou logarítmica).

Varredura B: Isso é semelhante à verificação A, exceto que os marcadores de saída e de altura do receptor são aplicados como pulsos de bloqueio no osciloscópio e as placas y são aterradas. A saída é como mostrado na Figura 1.3b.

Figura 1.3 a: Tipos de exibição da ionossonda – Varredura A

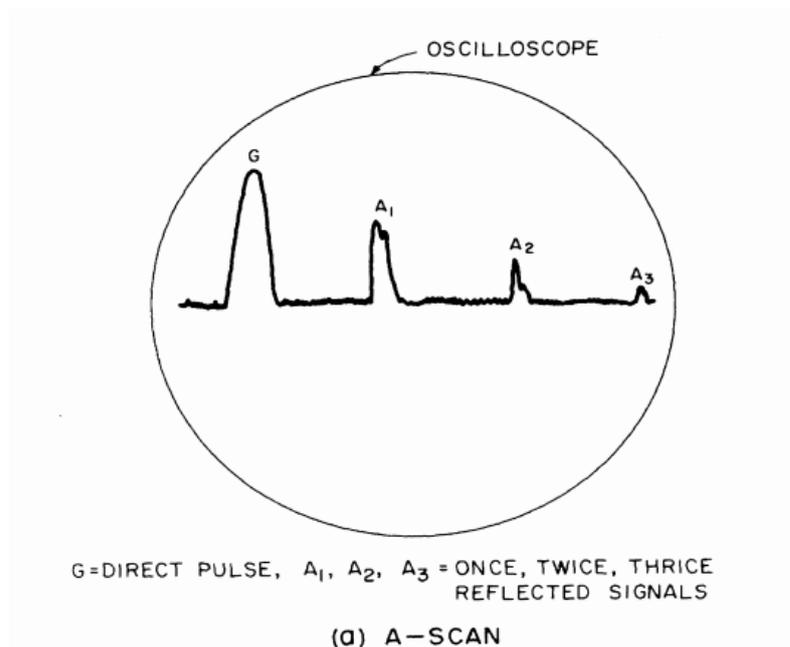
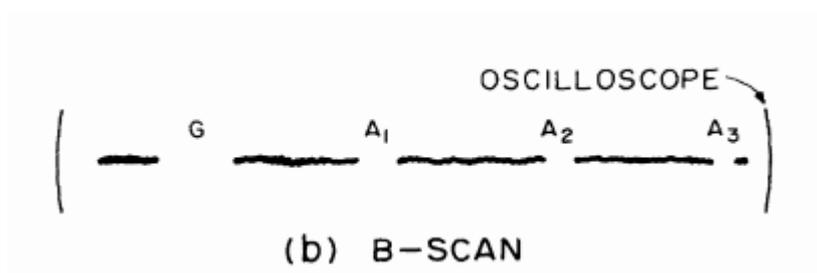


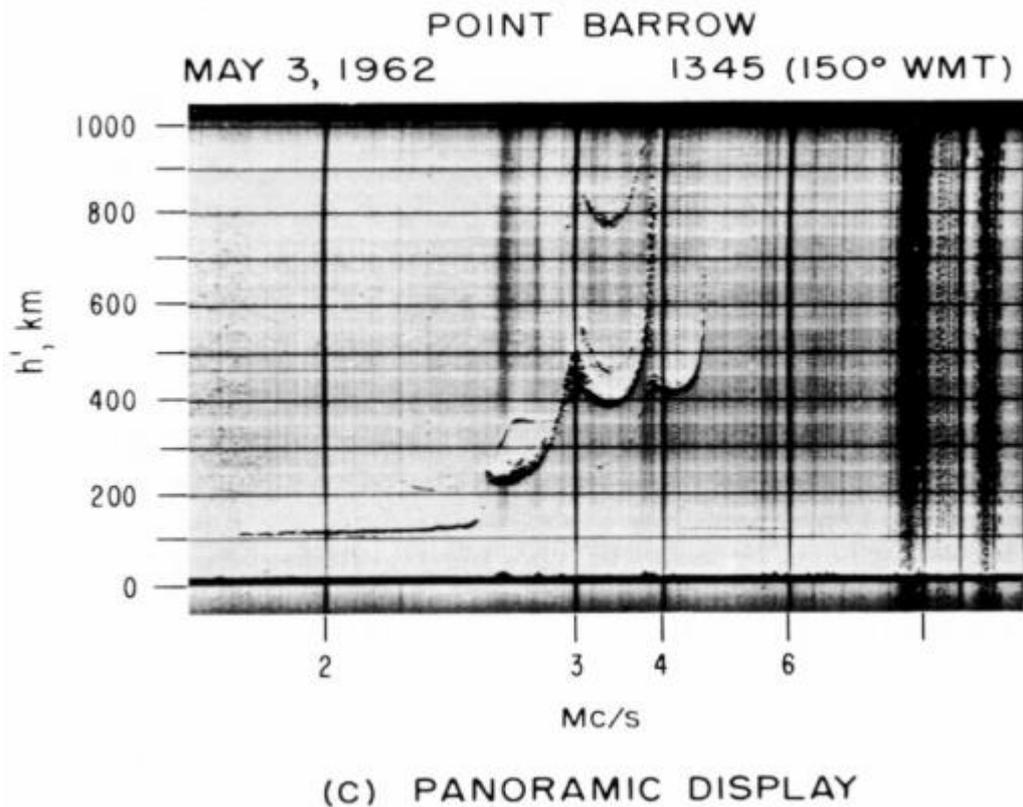
Figura 1.3 b: Tipos de exibição da ionossonda – Varredura B



Fonte: Davies, 1965

Exibição Panorâmica: A varredura B é usada com a base de tempo aplicada às placas y e a voltagem aplicada nas placas x que é função de frequência do transmissor. Toda a imagem em HF é fotografada em um único quadro de filme de 16 mm como ilustrado na Figura 1.3c.

Figura 1.3 c: Tipos de exibição de ionossonda – Panorâmica.



Fonte: Davies, 1965

Portanto, a ionossonda é um equipamento versátil e utilizado em todo observatório ionosférico. Ela tem a vantagem de que a quantidade medida (altura virtual) não depende da saída do transmissor ou do ganho do receptor. Isto significa que pode ser operado por usuários relativamente inexperientes. Isto é programado, automaticamente, para fazer varreduras a um determinado intervalo (por exemplo, a cada 15 minutos). A duração de uma varredura depende do design mecânico da ionossonda, mas existem limites práticos. Se a varredura for muito rápida, o receptor fica fora de sintonia com o eco refletido a partir da ionosfera. Varreduras com duração inferior a cerca de 15 segundos sofrem com esse efeito. Por outro lado, se a varredura for longa, a ionosfera em si pode ter mudado sensivelmente entre o início e o fim da varredura. Além disso, a ionossonda pode produzir interferência excessiva em outros sistemas de rádio.

1.2.1.1 O Gravador Virtual de Altura-Tempo

Este é um dispositivo de frequência fixa usando um visor de varredura B que opera continuamente. Desde que esse sinal não penetre a ionosfera, este sistema tem a vantagem de um monitoramento contínuo da ionosfera e é útil na detecção de eventos como um flare solar, por exemplo.

1.2.1.2 Medidas de Absorção

A ionosonda dá informações muito pequenas sobre a região D, pois as reflexões provindas dessa região tendem a ser do tipo parcial e não do tipo refrativo. Além disso, as frequências mais baixas são fortemente absorvidas na ionosfera inferior por causa da alta frequência de colisão que ocorrem nestas alturas.. Esta absorção é muito importante para o operador de rádio porque define um limite inferior para a potência e/ou a frequência com que ele pode operar. Portanto, as medidas de absorção são de importância prática e, também, elas dão a informação do conteúdo total eletrônico na região D. Alguns dos métodos usados serão discutidos abaixo. Estes métodos são melhores descritos, por Piggot et al. (1957).

1.2.1.3 O Método de Reflexão do Pulso

Este método envolve a medição das amplitudes de ecos sucessivos com uma exibição de varredura A. As amplitudes geralmente são obtidas visualmente, observando o ganho necessário para trazer os topos dos traçados do osciloscópio para uma marca fiduciária ou calibrando a face do osciloscópio.

Isto é conveniente para expressar as proporções de amplitude em termos de um coeficiente de reflexão aparente ρ . Este parâmetro é a razão da amplitude I de uma onda que é refletida uma vez na ionosfera para a amplitude I'_0 que teria sido recebido na ausência de atenuação de dissipação, mostradas nas equações 2 e 3.

$$I = I'_0 \exp \left(- \int k ds \right), \quad (2)$$

$$\int k ds = - \ln \rho. \quad (3)$$

Na prática, a absorção é usualmente medida em termos da perda de decibéis, L, onde:

$$L = -20 \log \rho = -8.7 \ln \rho. \quad (4)$$

Na ausência de absorção, a amplitude I de uma onda refletida a partir de uma altura de grupo h' é dada por

$$Ih' = I_0h_0, \quad (5)$$

onde I_0 é a amplitude que teria sido recebida se a reflexão tivesse ocorrido a uma taxa de altura padrão h_0 . Quando a absorção está presente, as amplitudes das primeiras reflexões I_1 , segundo I_2 , e outras ordens I_r são dadas por

$$I_1h' = \rho I_0h_0 = \rho G, \quad (6)$$

$$2I_2h' = \rho \rho_g I_1h' = \rho^2 \rho_g G, \quad (7)$$

$$rI_rh' = \rho^r \rho_g^{r-1} G, \quad (8)$$

onde ρ_g é o coeficiente de reflexão aparente do solo e $G = (I_0h_0)$ pode ser considerado como uma constante de calibração.

O fator de calibração G pode ser achado medindo as amplitudes de múltiplos sinais refletidos quando a absorção é baixa (período noturno) e pode então ser usado para medir ρ quando a absorção é alta. Quando G é conhecido, ρ pode ser encontrado a partir do grupo de altura e amplitude do eco refletido.

O principal problema prático na medição de absorção por esta técnica é introduzido pelo enfraquecimento contínuo do sinal refletido. Esta questão é também complexa para ser considerada aqui, mas requer que uma amostra estatística adequada seja usada para derivar uma amplitude média. Para medições de incidência vertical dentro da banda de HF, períodos entre 15 e 20 minutos são comuns e é desejável a média entre tais períodos. Claro, se o período de média é excessivo, a própria absorção pode ter mudado durante o intervalo.

A principal desvantagem deste sistema é que as medidas são realizadas manualmente para valores de L . Além disso, surgem inexatidões por causa dos ruídos e das interferências, polarização, dispersão do pulso, reflexão parcial e espalhamento. (Piggot et al., 1957).

1.2.1.4 Gravações de Intensidade de Campo de Onda Contínua (CW)

Neste método, um transmissor de ondas contínuas (CW) é usado. Este tipo de receptor de comunicação é alimentado por uma antena calibrada e a saída é registrada por um gravador.

O método de gravação CW para medições de absorção ionosféricas tem uma vantagem para gravações contínuas. Contudo, a desvantagem é de não poder separar os vários ecos. O campo total recebido em qualquer instante é resultado das diferentes ordens dos ecos e de ondas ordinárias e extraordinárias, todos desaparecendo independentemente do outro. Aproximadamente, a média da resultante da intensidade do campo é a raiz quadrada da soma dos quadrados dos valores médios de todos os seus componentes. Do conhecimento da absorção das ondas ordinárias e extraordinárias e usando a regra dos mínimos quadrados. A intensidade do campo da onda ordinária pode ser obtida.

Se o transmissor e o receptor estão próximos entre si, de modo em que a incidência seja essencialmente normal é possível calibrar o equipamento (aproximadamente) ao assumir que os sinais noturnos não são absorvidos na ionosfera.

1.2.2 Método do Riômetro

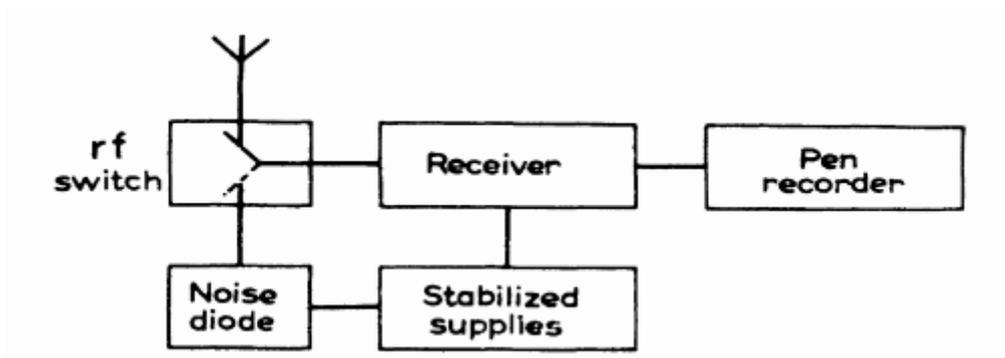
O riômetro (rio = opacidade ionosférica relativa) consiste em um sistema antena-rádio receptor sensível à intensidade de ondas eletromagnéticas (38.2 MHz) de origem solares e galácticas, que incidem na alta atmosfera terrestre. O uso do ruído de rádio cósmico para medir a absorção da ionosfera foi desenvolvido por Piggot et al (1957). O princípio é o seguinte:

A energia do ruído de rádio incidente em um ponto fora da atmosfera terrestre a partir de uma determinada direção no espaço é assumida como constante em relação ao tempo. Os ruídos energéticos recebido em um sistema de recepção fixa na superfície terrestre devem, portanto, ser uma função somente do tempo sideral, pois cada dia o feixe aéreo explorará a mesma faixa do céu que a Terra gira. A transparência da atmosfera em um determinado instante de tempo é, portanto, dada pela razão da

intensidade do sinal realmente recebida ao recebido no mesmo tempo sideral em condições de pouca absorção ionosférica.

O equipamento mais simples capaz de medir ruídos cósmicos consiste em um receptor de ganho estável conectado a uma antena (input – entrada) e a um gravador de caneta (output- saída), como ilustrado no diagrama de blocos na Figura 1.4, junto com um diodo de ruído, para fins de calibração e fontes de energia estabilizadas. A calibração é realizada, automaticamente, desligando periodicamente a antena e alimentando no receptor, uma quantidade conhecida de energia de ruído do diodo.

Figura 1.4: Diagrama de blocos do riômetro.



Fonte: Davies, 1965

Para entender como o método funciona, considere uma antena apontada para o céu, cuja temperatura seja T_s . Se a largura da banda do sistema de recepção for B a potência disponível é:

$$P_1 = kT_B B \quad (9)$$

Se agora algum meio absorvente (como a ionosfera) cujo um coeficiente de transmissão de potência e temperatura α é inserido sobre todo o feixe de antena, a energia recebida do céu seria reduzida para $\alpha k T_B B$. O meio absorvente, no entanto, irradia o ruído em proporção à sua temperatura e sua eficácia como absorvedor. A antena irá um sinal adicional $P_2 = k(1 - \alpha)T_i B$ do meio absorvente.

No caso onde o sinal é transferido para o receptor através de um cabo de transmissão, das quais o coeficiente energético de transmissão é E , a própria linha de transmissão atuará como um atenuador e um gerador de ruído de rádio P_c . O ruído que atinge o receptor é dado por:

$$E[\alpha kT_B B + k(1 - \alpha)T_i B] + (1 - E)kT_c B, \quad (10)$$

onde T_c é a temperatura da linha de transmissão. Assume-se que a antena e o receptor são ambos correspondentes a linha de transmissão e a energia de transferência da antena para o receptor é completa. Esta energia recebida irá juntar-se ao ruído gerado dentro do receptor, que é dado por:

$$P_r = (F - 1)kTB, \quad (10)$$

onde T é a temperatura ambiente e F o fator de ruído do receptor.

Se o sistema acima receber ruídos cósmicos de rádio, a energia de saída P_0 do receptor pode ser escrita por:

$$P_0 = G(P_s + P_i + P_c + P_r + I), \quad (11)$$

onde P_s = potência de ruído provindo do céu = $E\alpha T_s kB$,

P_i = potência de ruído provindo da ionosfera = $E(1 - \alpha)T_i kB$,

T_s, T_i = temperaturas efetivas do céu e da ionosfera,

P_c = potência de ruído do receptor = $(F - 1)TkB$,

I = interferência,

G = ganho de energia do receptor.

O problema introduzido pela interferência pode ser parcialmente removido registrando o sinal mínimo recebido enquanto a frequência do receptor é varrida para uma pequena faixa de frequência (mas muitas larguras de banda). Vários outros refinamentos são discutidos por Piggot et al. (1957).

Deve ter em atenção que o riômetro é utilizado apenas em frequências acima da frequência de penetração. Uma frequência típica é aproximadamente 30 MHz. A desvantagem de tais altas frequências é que a absorção da ionosfera é baixa e é necessário medir pequenas mudanças na absorção. Um riômetro geralmente pode medir mudanças de absorção baixas de cerca de 0,1 dB.

1.2.2.1 Observações de Frequência Mínima

A absorção varia inversamente com o quadrado da frequência da onda. Assim, ao tocar a ionosfera com uma ionossonda convencional, a frequência mínima observada ($f_{min}F$) é aproximadamente uma função da absorção ionosférica. A característica $f_{min}F$ tem sido amplamente utilizada como índice de absorção ionosférica e seu uso é justificado desde que as mudanças de absorção sejam grandes em comparação com as demais características variáveis da ionosfera.

1.2.3 Medidas de Fase

1.2.3.1 Mudança do Período Relativo

Apesar de não ser possível determinar o período absoluto de um sinal refletido, é possível medir, com precisão, mudanças no período. Isso pode ser feito misturando o sinal recebido de frequência f_e com um sinal de oscilador local de frequência f_r de aproximadamente a mesma amplitude e diferindo dele em frequência por uma pequena quantidade ($f_e - f_r$). O período do sinal do oscilador de referência deve ser altamente estável ou então deve ser bloqueado para o sinal irradiado. Com o advento dos osciladores de cristal, estáveis portáteis e padrões de frequência atômica, a alternativa anterior é possível. O eco e o sinal de referência são recebidos juntos no receptor e dão um sinal de frequência ($f_e - f_r$). Isso dá um traço sinusoidal na tela de um osciloscópio quando a saída do receptor é aplicada nas placas y e uma base de tempo linear é aplicada nas placas x. Os movimentos do traçado de período sinusoidal representam o período variável do eco. Tal método foi descrito por Findlay (1951). A modificação adequada deste arranjo permite que as mudanças de períodos sejam rastreadas eletronicamente e exibidas em um gravador de canetas ao invés de em papel fotográfico.

1.2.3.2 Alterações de Frequências

Quando as alterações do período com o tempo são lentas, o método acima é muito adequado. Por outro lado, se o período muda rapidamente com o tempo, há uma mudança Doppler na frequência recebida e, muitas vezes, é conveniente medir as mudanças de frequência ao invés da mudança de período. A técnica é similar ao descrito acima. Através de uma modificação realizada por Orgawa (1958) e por Fenwick e Villard (1960), o sinal de frequência recebido pode ser diretamente salvo em um gravador a caneta e as alterações de frequência determinada por inspeção. Uma

desvantagem das duas medidas de fase descritas acima são que elas fornecem a variação de frequência da onda. Uma melhoria para isso é a técnica desenvolvida por Watts e Davies (1960) que também fornece uma solução para um problema de armazenamento de dados. Este método envolve análise espectral do sinal recebido. A batida do sinal é alimentada diretamente no cabeçote de um gravador de fita magnética cuja velocidade é 0,02 ips (polegadas por segundo). A essa velocidade, um rolo de fita de 1800 pés pode armazenar dados continuamente por mais de uma semana. No final a fita é tocada em um analisador de espectro de áudio a uma velocidade de 30 ips, digamos. Isso resulta em uma multiplicação de frequência de 1500 MHz. Portanto, esse processo converte a frequência de batida de alguns ciclos por segundo em um tom de áudio. Um analisador comercial de 420 canais com uma largura de banda total de 10,5 kHz e uma largura de banda de canal de 32 Hz é utilizado para análise. Com esse sistema, a resolução de frequência é de cerca de 0,2 Hz e a resolução do tempo é inferior a 1 min. Este método de gravação é adequado para o estudo de fenômenos transitórios, como os efeitos ionosféricos associados aos flares solares e aos aumentos magnéticos súbitos. Um registro de amostra coletado durante um flare solar é mostrado na Figura 1.5.

1.2.4 Ângulo de Chegada

1.2.4.1 Direção

As inclinações e irregularidades ionosféricas dão origem a raios de rádio que ficam fora do círculo de visão do transmissor, do receptor e do centro da terra. Várias técnicas foram desenvolvidas para medir os ângulos azimutais da chegada dos sinais e um relato das técnicas modernas.

1.2.4.2 Ângulo Vertical

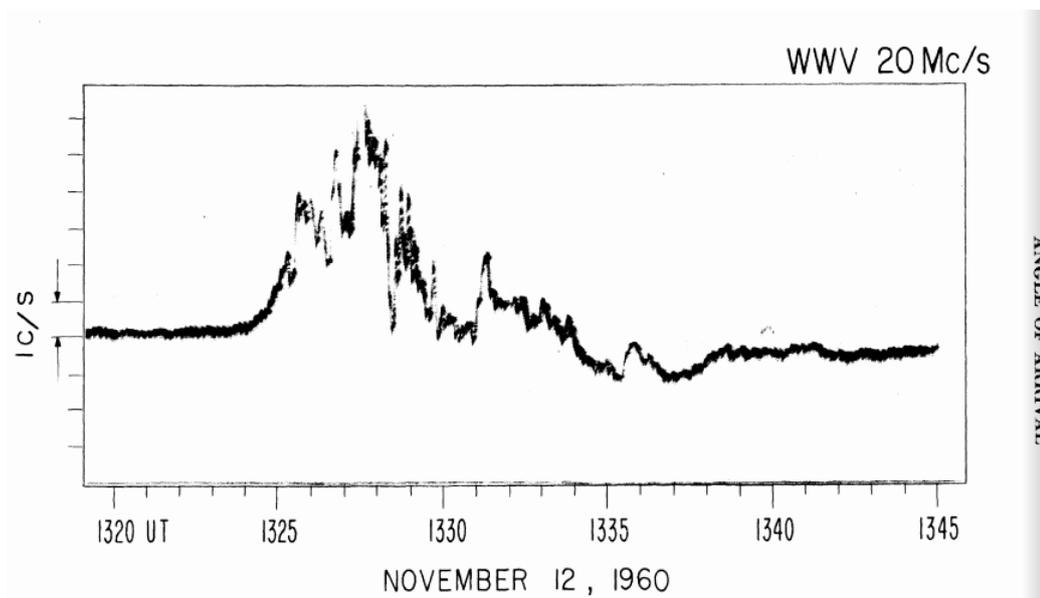
Existem três métodos principais de medir o ângulo de chegada vertical: (1) o método de medição de fase, (2) o uso da antena orientável, e (3) o uso de duas antenas com diferentes padrões de radiação no plano vertical. O sistema mais comum é (1) e depende do fato de que quando uma onda de rádio (do comprimento de onda λ) de uma determinada direção chega a duas antenas de recepção, separadas por uma distância conhecida d . O ângulo de fase ϕ entre as tensões induzidas é

$$\phi = \frac{2\pi d}{\lambda} \cos \Delta \cos \psi, \quad (12)$$

onde Δ é o ângulo vertical medido a partir da horizontal e ψ é o ângulo azimutal, medido a partir de uma linha que une os centros das duas antenas. Na prática, as antenas são orientadas com seus centros no plano do campo de visão que passa pelo transmissor e receptor de modo que $\psi \approx 0$. Para medições precisas é necessário corrigir a variação de ψ .

O sistema para medir um ângulo vertical consiste em um conjunto de antenas com um lóbulo muito afiado que pode ser orientado para cima e para baixo no plano vertical. O ângulo vertical é determinado pela posição do lóbulo em que o sinal recebido. No terceiro sistema, as antenas podem ser pares idênticos em diferentes alturas acima do solo ou uma pode ser horizontal e a outra vertical. Em ambos os casos, os padrões da antena devem ser conhecidos. Uma aplicação útil deste método é a incidência normal de som onde os dipolos estão localizados em alturas que dão (1) um máximo, (2) um nulo na direção zênite. Este arranjo permite determinar se os ecos são retornados de sobrecarga ou dispersos obliquamente.

Figura 1.5: As variações de frequência da WWV-20 recebidas em Boulder, Colo., durante um flare solar em 12 de novembro de 1960.



Fonte: Davies, 1965

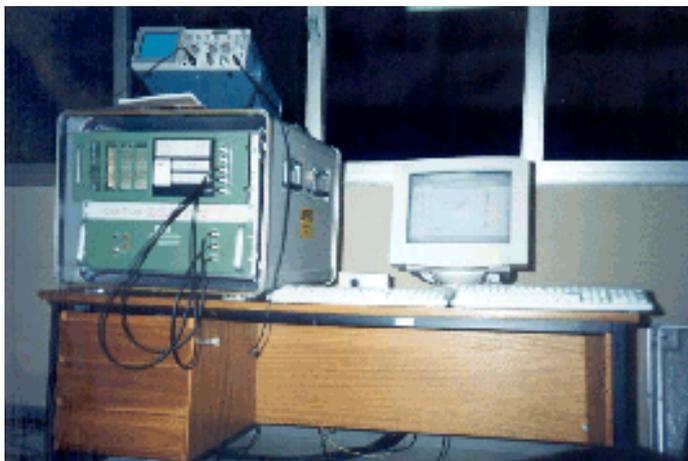
CAPÍTULO 2 – INSTRUMENTAÇÃO

Os dados relacionados à ionosfera foram obtidos a partir de digissondas do modelo DPS, que estão posicionadas em baixas latitudes em relação ao equador magnético. Em relação as análises relacionadas ao fluxo de partículas de Raio-X, foram usados dados provenientes de detectores de Raios-X a bordo do satélite GOES.

2.1 Digissonda DPS

A digissonda utilizada para as análises foram do modelo DPS (Figura 2.1) instalada em São Luís e Boa Vista e modelo DGS256 em Cachoeira Paulista, ambas com a mesma estrutura em geral. Assim como as ionossondas, porém de forma digital, essas digissondas fornecem 49 parâmetros ionosféricos e utilizam da técnica de emitir pulsos de rádio frequência (RF) que variam de 1 até 30 MHz com potência de pico de 600 W (Almeida, 2006), através de uma antena transmissora e recebe esses pulsos através de antenas receptoras do tipo delta.

Figura 2.1: Computadores da digissonda do modelo DPS instalada em São Luís



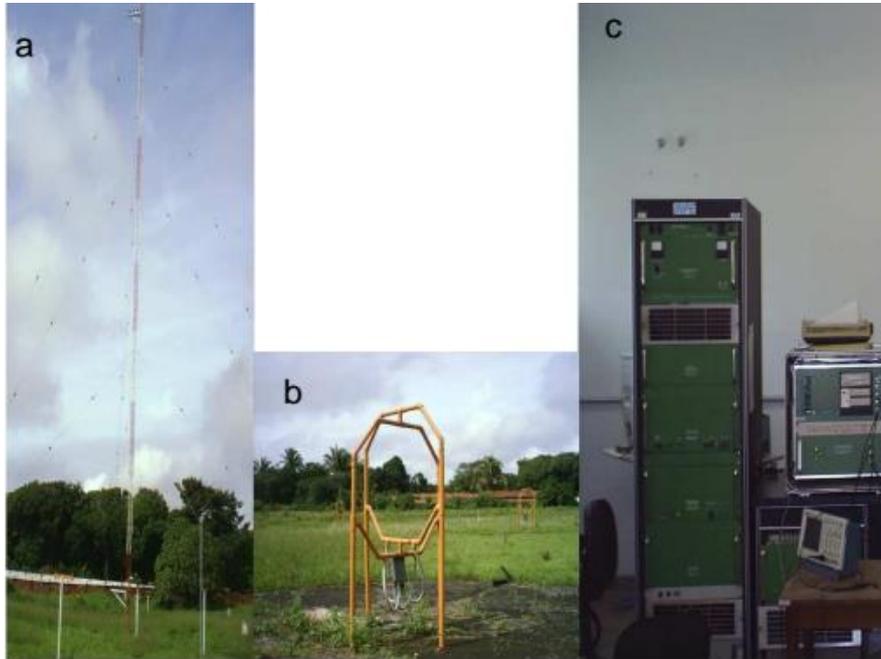
Características da Digissonda

A digissonda é composta por:

- Antena transmissora, usada para emitir curtos pulsos de rádio (Figura 2.2 a);
- Antenas receptoras do tipo Delta com cargas resistivas de 600 Ohms (Almeida, 2006), usada para receber os pulsos de rádio transmitido (Figura 2.2 b);
- Computadores, usado para o processamento dos dados obtidos (Figura 2.2 c);
- 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; e
- Receptor e Transmissor de pulsos de RF.

Figura 2.2: (a) antena transmissora; (b) antena receptora do tipo delta; (c) sistema de controle, pré-processamento e transmissão de dados.

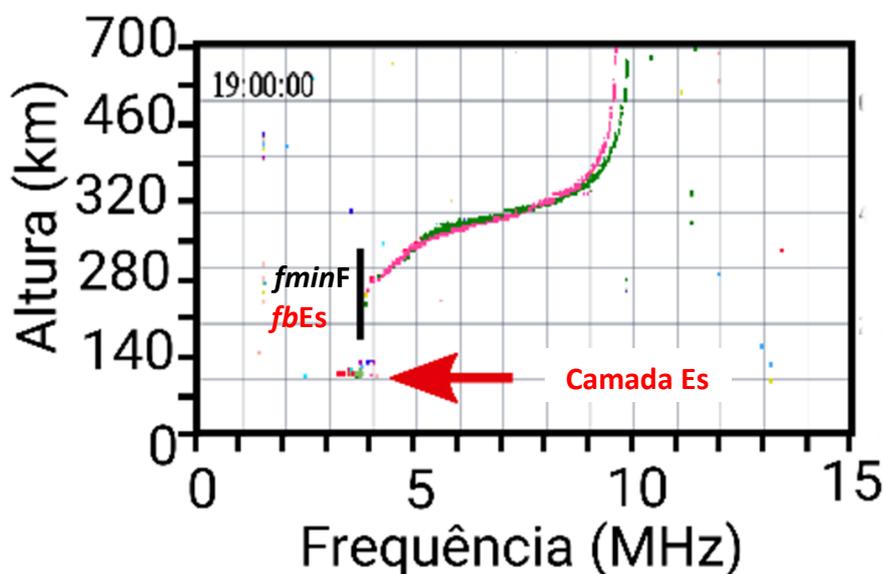


Fonte: Cortesia Sra. Maria Goreti.

2.1.1 Dados fornecidos pela Digisonda

A digisonda fornece dados em gráficos de altura virtual de reflexão por frequência do sinal refletido com traços adequadamente organizados a partir dos ecos refletidos pelas camadas ionosféricas, chamados de ionogramas (Bertoni, 2004). Os ionogramas faz com que se torne possível perceber um perfil para a região F e para a região E. Através disso, é possível obter parâmetros, dentre muitos outros, como a frequência mínima da região F ($f_{min}F$) e a frequência em que as camadas Es bloqueiam as regiões superiores ($fbEs$) que serão os mais utilizados neste trabalho. Esses dois parâmetros serão alocados no mesmo ponto, porém o $fbEs$ só será obtido na presença de camadas Es. A Figura 2.3 apresenta um ionograma com os parâmetros citados.

Figura 2.3: Ionograma do ano de 2015 para a região de São Luís mostrando os parâmetros $f_{min}F$, f_bEs e polarização.



2.2 Satélite GOES

O satélite *Geostationary Operational Environmental Satellite* (GOES) é operado pelo *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) que possui a bordo um sensor de Raios-X (XRS) desde 1974. Esse sensor é composto por uma câmera de partículas capaz de detectar Raios-X provenientes de todas as direções do Sol tornando possível observar um aumento súbito de radiação provindo de uma explosão solar. Duas faixas são medidas para permitir a solidez do espectro solar a ser estimado. O arquivo completo que contém as medidas de Raios-X tem uma resolução de aproximadamente 3,6 segundos (Resende, 2010).

As explosões solares são classificadas de acordo com suas intensidades do fluxo de partículas de Raios-X dada em Watt / metro² sendo elas:

- As explosões da classe X, as quais têm associadas a elas Raios-X com a intensidade a partir de 10^{-4} W/m²;
- As explosões da classe M, as quais têm associadas a elas Raios-X com a intensidade entre 10^{-5} e 10^{-4} W/m²;
- As explosões da classe C, as quais têm associadas a elas Raios-X com a intensidade entre 10^{-6} e 10^{-5} W/m²;

- As explosões da classe B, as quais têm associadas a elas Raios-X com a intensidade entre 10^{-7} e 10^{-6} W/m²; e
- As explosões da classe A, as quais têm associadas a elas Raios-X com a intensidade entre 10^{-9} e 10^{-7} W/m².

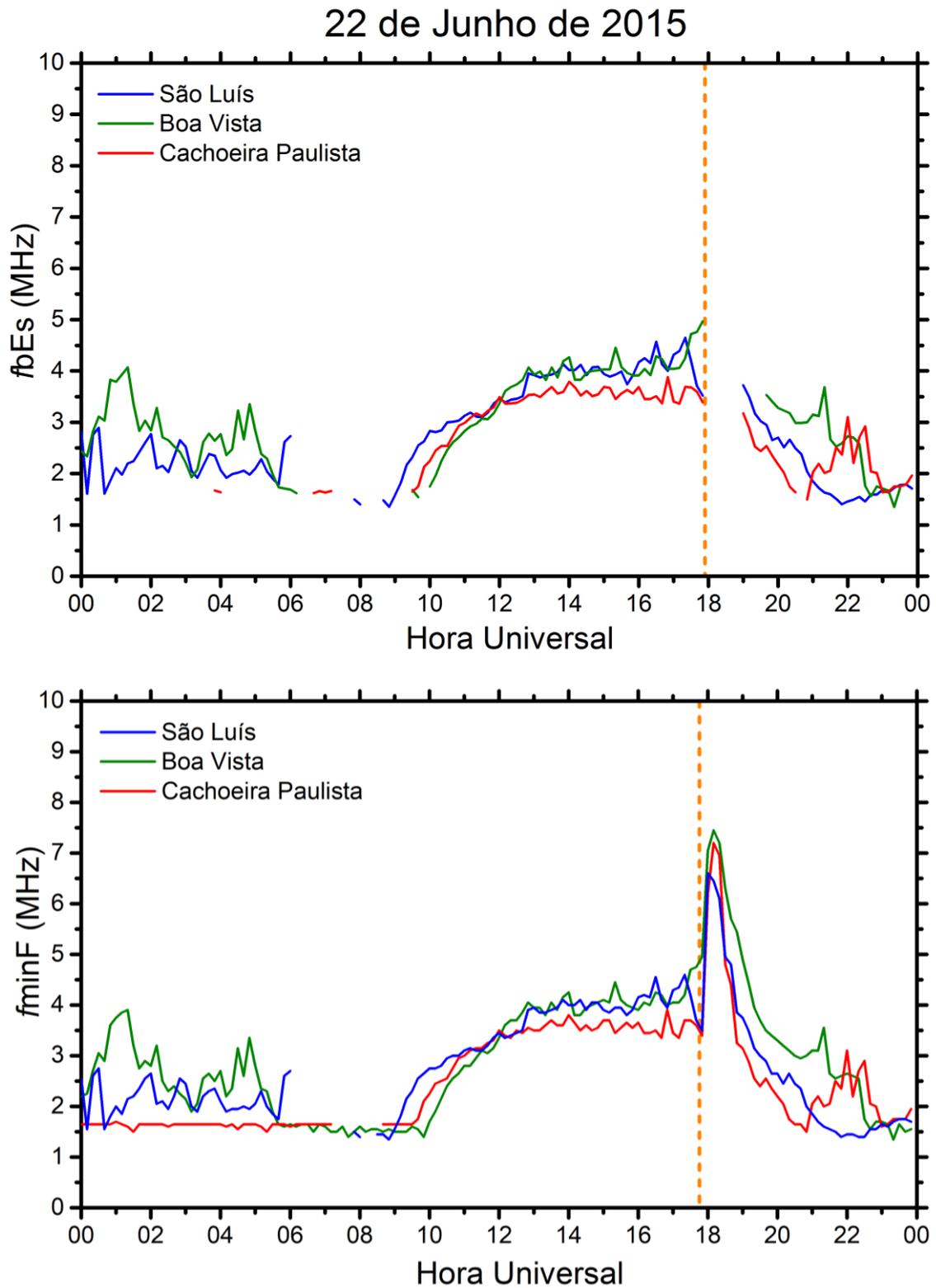
Sendo os de classe X as mais energéticas. Dentro dessas divisões existem subdivisões como M1, M2, M3, M4, M5, M6 e M9 que determinam o nível de intensidade do fluxo de Raios-X dentro da divisão M.

CAPÍTULO 3 – ESTUDO DA INFLUÊNCIA DE UM FLARE SOLAR NA IONOSFERA

Neste capítulo será abordado um exemplo do estudo de um flare solar nas três regiões brasileiras: Boa Vista, São Luís e Cachoeira Paulista. O dia escolhido para este estudo de caso foi o dia 22 de junho de 2015.

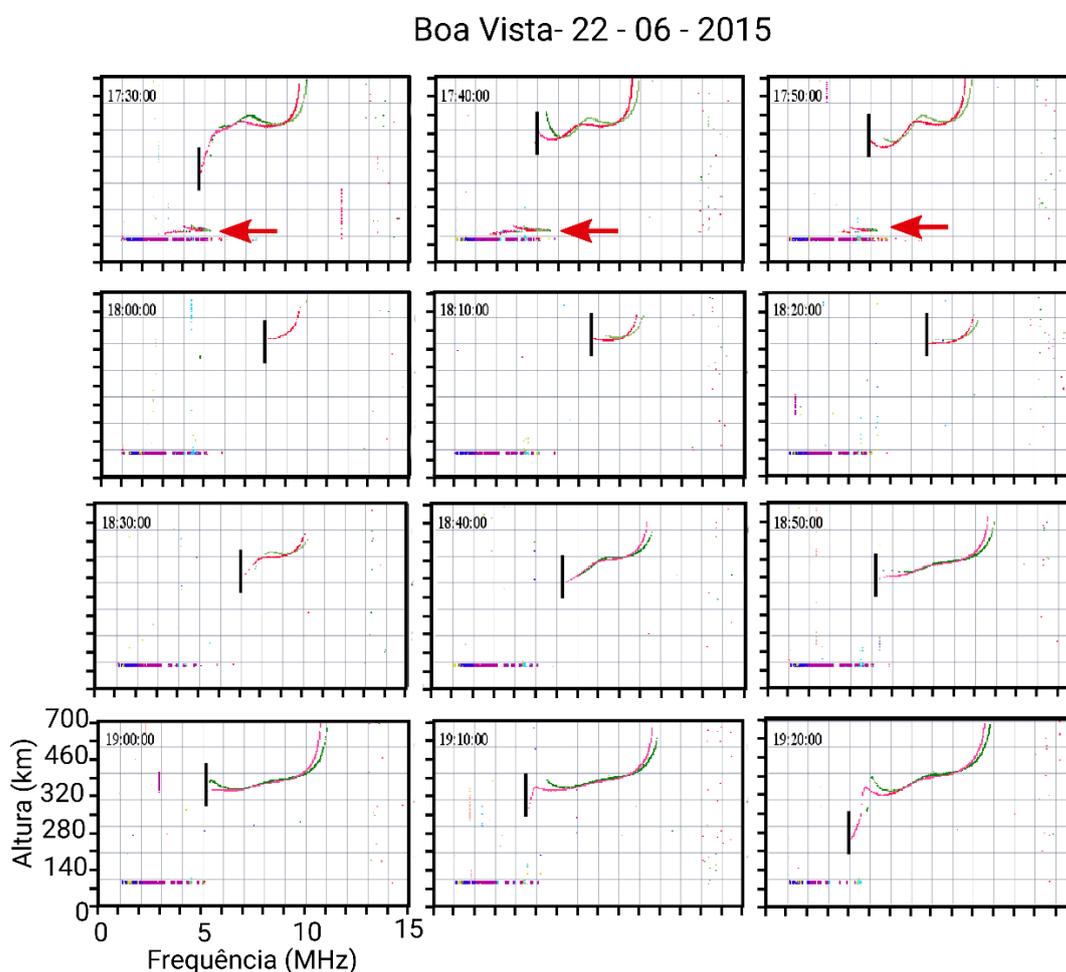
Para este estudo de caso, tem-se a Figura 3.1 que mostra o comportamento dos parâmetros $fbEs$ e $fminF$ diante de uma forte tempestade magnética seguido de um flare solar de classe M 6.5 $watts/m^{-2}$. A figura mostra que na hora da tempestade e pico do flare, o parâmetro $fbEs$ some enquanto o $fminF$ tem um pico de aproximadamente 8 MHz sendo Boa Vista e Cachoeira Paulista os que possuem maior valor. Esse fato diz que com a ausência do $fbEs$, a camada Es e a região E foi totalmente absorvida e que com o pico do $fminF$, houve absorção parcial da região F, como mostrado nas Figuras 3.2, 3.3 e 3.4.

Figura3.1: Parâmetro f_bEs e $f_{min}F$ para as três regiões de estudo em 22 de Junho de 2015



As Figuras 3.2, 3.3 e 3.4 apresentam ionogramas com os parâmetros $f_{min}F$ e $fbEs$ para as três regiões estudadas. É possível ver que para a região de Boa Vista (figura 3.2), o traço da região F está visível às 1730 UT e é bloqueado nos horários seguintes pela camada Es. Portanto, o $fbEs$ e o $f_{min}F$ observados são praticamente coincidentes. Às 1800 UT, horário do flare solar, é notado que a camada Es não é mais observada no ionograma. Este fato é observado durante um longo período, indicando que o sinal das ondas de rádio foi absorvido pela alta ionização da região D causado pelo flare solar. A região F também foi absorvida parcialmente até às 1840 UT quando o seu traço começa a reaparecer em frequências mais baixas (vide traço preto).

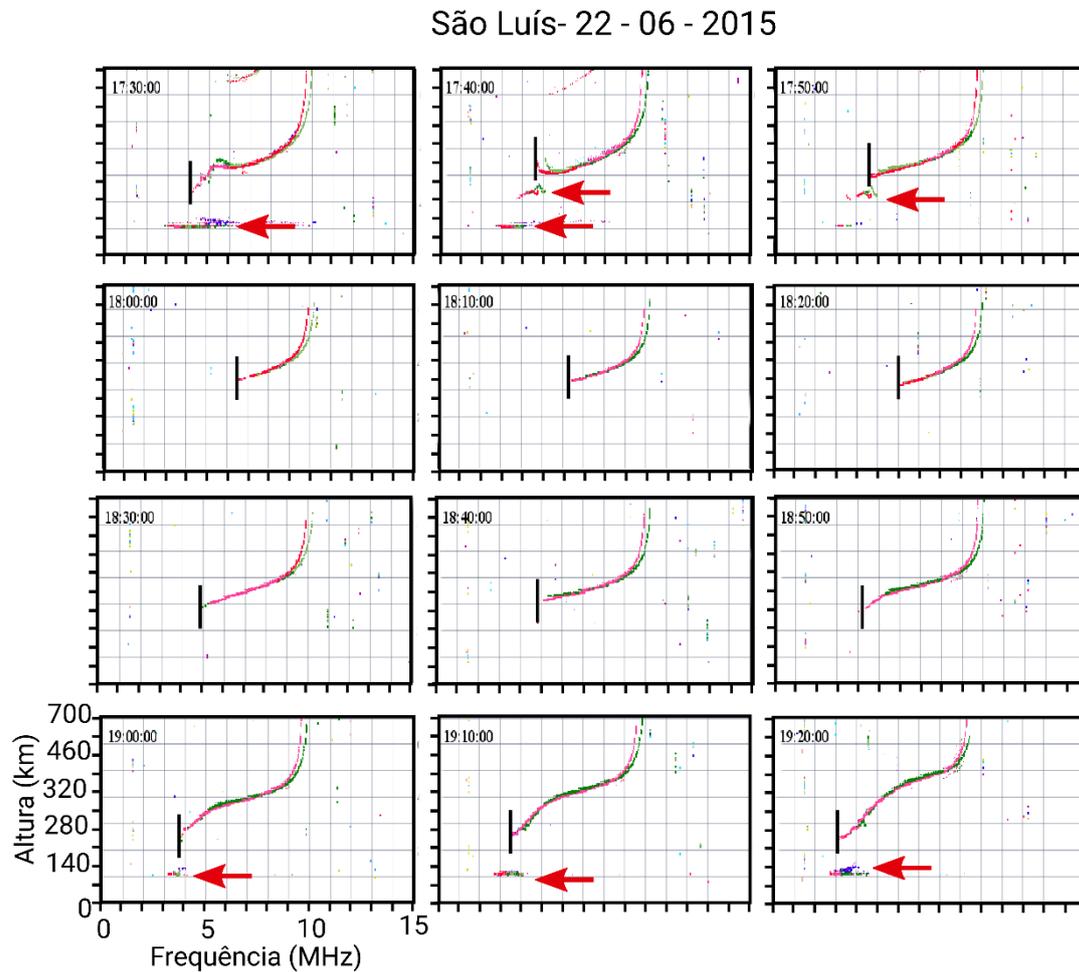
Figura 3.2: Ionograma para a região de Boa Vista em 22 de junho de 2015.



O mesmo fato é observado em São Luís como mostrado na Figura 3.3. Nesse caso, observa-se a formação de mais de uma camada Es até 1750 UT (seta vermelha) que bloqueia a região F (traço preto). Contudo, a partir das 1800 UT nenhuma camada Es é observada e a região F também se mostra parcialmente absorvida. Essa absorção

dura até 1850 UT, quando a camada Es é observada novamente nos ionogramas bem como o traço da região F em frequências mais baixas.

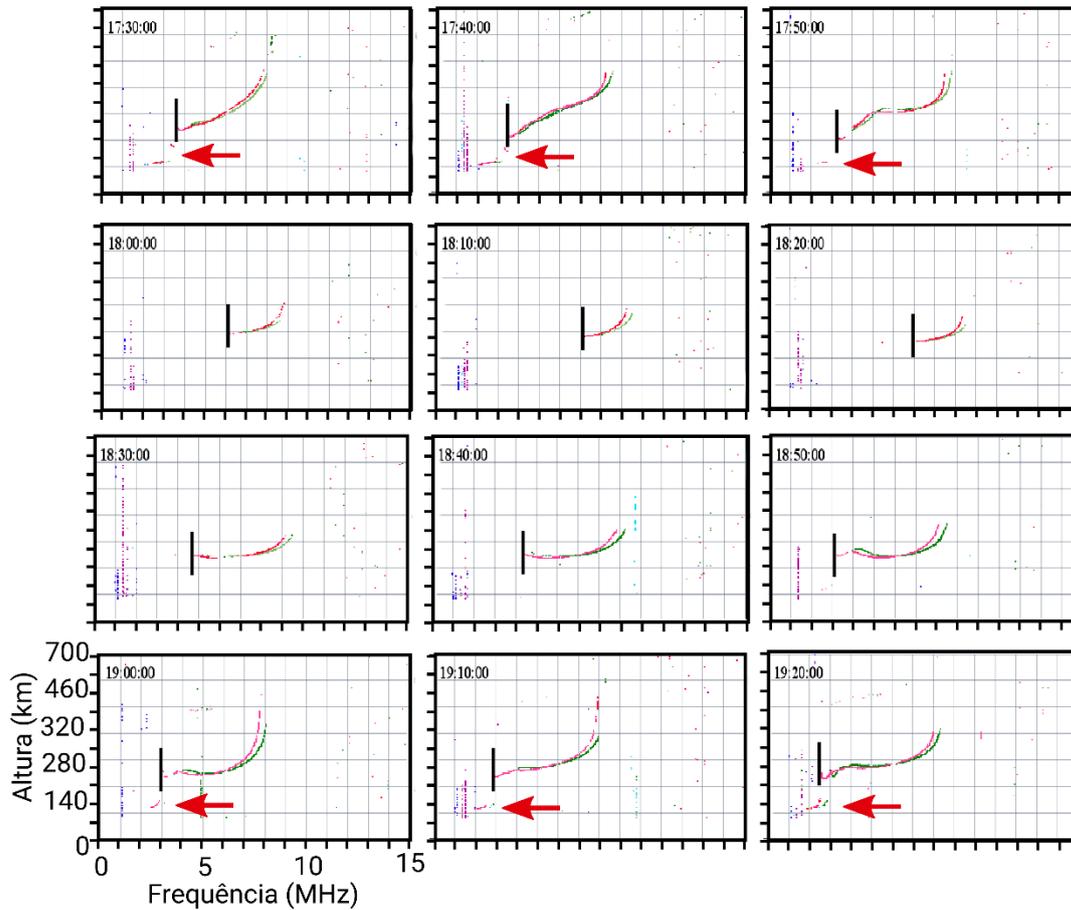
Figura 3.3: Ionograma para a região de São Luís em 22 de junho de 2015.



Em Cachoeira Paulista uma camada do tipo “h” é observada entre 1730 UT e 1750 UT, seta vermelha da Figura 3.4. Nesse caso, a região F é claramente observada inteira uma vez que a camada Es não é forte suficiente para bloqueá-la. Mas, é notado que a absorção tanto na camada Es e na região F ocorre também entre 1800 UT e 1850 UT. Após este horário é observada uma fraca Es com a região F nos ionogramas de Cachoeira Paulista.

Figura 3.4: Ionograma para a região de Cachoeira Paulista em 22 de junho de 2015.

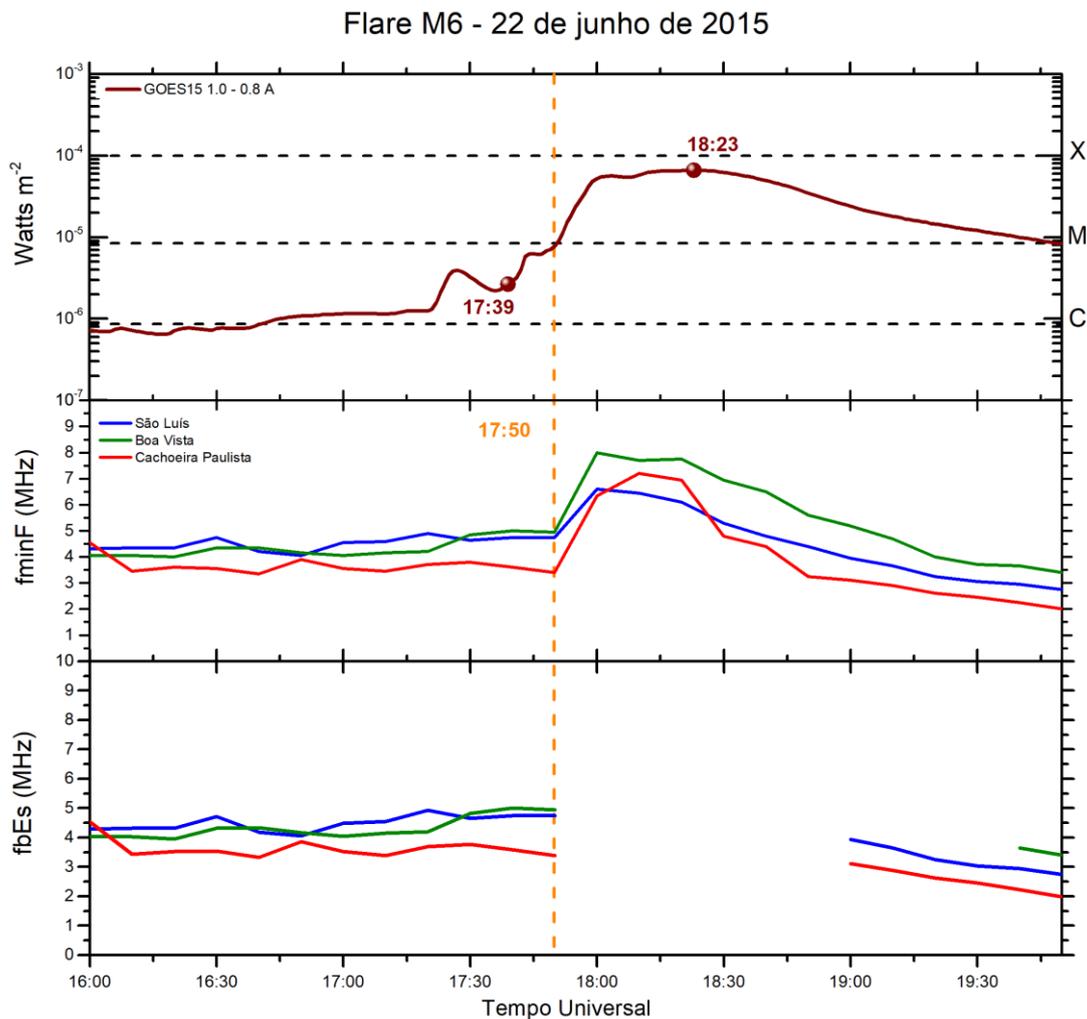
Cachoeira Paulista- 22 - 06 - 2015



3.1 Interação entre o Flare Solar e a Ionosfera Brasileira

A Figura 3.5 apresenta o estudo do tempo de interação entre o flare solar e a ionosfera para o estudo de caso do dia 22 de junho de 2016. A parte superior da figura mostra a ocorrência de um flare de classe M 6.4 que teve início às 1739UT e o pico às 1823UT (linha bordo) obtido dos dados a bordo do satélite GOES. Abaixo desses dados estão os parâmetros $fminF$ e $fbEs$ para as três regiões brasileiras, Boa Vista (linha verde), São Luís (linha azul) e Cachoeira Paulista (linha vermelha). Os parâmetros de frequência estão em MHz e os dados em hora universal (UT).

Figura 3.5: Análise do tempo de interação entre flare solar e ionosfera utilizando os parâmetros $fbEs$ e $fminF$ para Boa Vista (linha verde), São Luís (linha azul) e Cachoeira Paulista (linha vermelha).



Através da Figura 3.5 pode-se observar que o parâmetro $fbEs$ desaparece às 1750 UT, 10 minutos antes do pico, para as três regiões. O parâmetro $fminF$ começa a se elevar no mesmo horário para todas as regiões, mas tem o seu ponto máximo em horários distintos. Em Cachoeira Paulista e São Luís o pico do $fminF$ ocorre às 1810 UT e em Boa Vista às 1800 UT. É notável que em Boa Vista o pico do $fminF$ é mais expressivo (8 MHz) e, portanto, conclui-se que Boa Vista foi a região que obteve maior influência.

Finalmente, a fim de analisar com mais detalhes a influência do tempo de resposta da ionosfera brasileira devido a um flare solar, foi realizado um estudo climatológico apresentado no capítulo a seguir.

CAPÍTULO 4 – ESTUDO CLIMATOLÓGICO SOBRE A INFLUÊNCIA DO FLARE SOLAR NA IONOSFERA BRASILEIRA

Neste capítulo será abordado o tempo de influência de um flare solar de classe M ou X nas regiões E e F bem como as camadas Es. Como mencionado anteriormente, o objetivo desse trabalho é observar qual região brasileira é mais influenciada por um flare solar e o tempo de interação entre o pico do flare e o início da influência na ionosfera.

4.1 Seleção de Dados

Neste estudo foram selecionados os flares solares de classes M e X para o ano de 2015. O principal objetivo deste trabalho foi relacionar o tempo entre a ocorrência de um flare solar e o efeito nas regiões ionosféricas. Para isso, foram escolhidas três regiões distintas de baixas latitudes: Boa Vista; São Luís e Cachoeira Paulista. A Tabela 1 refere-se à seleção dos dados utilizados neste trabalho.

Tabela 1: Seleção de dados de flares classe M e X em 2015

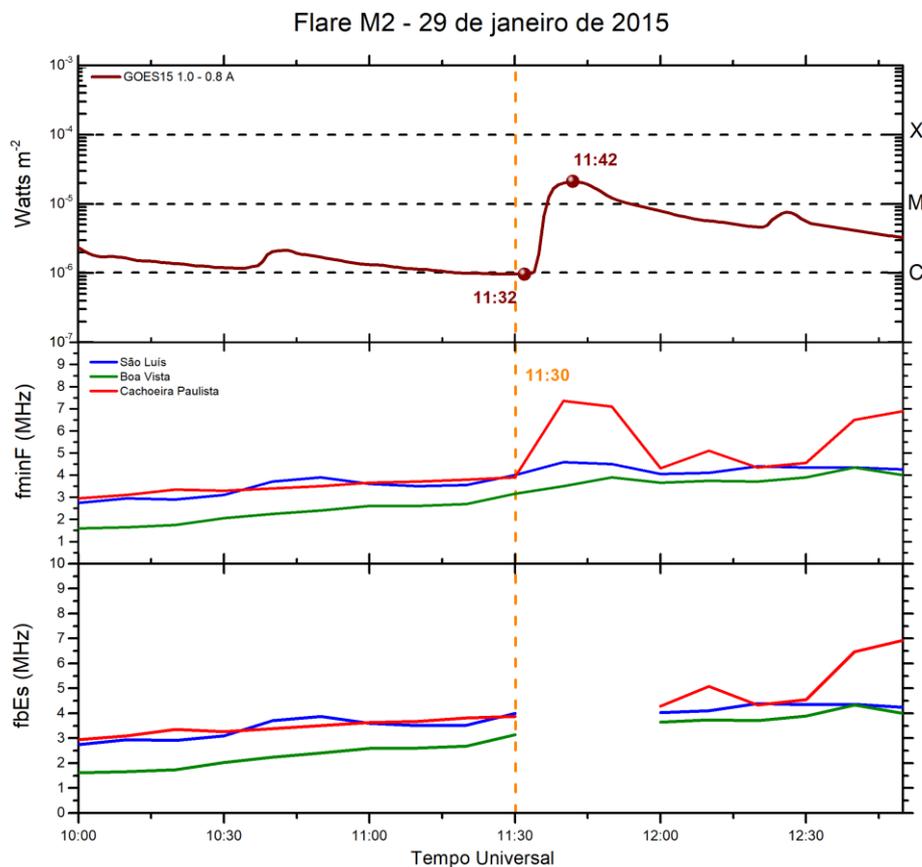
Ano	Dia	Classe do flare	Hora de início do flare (UT)	Hora de pico do flare (UT)
2015	29/Jan	M2	11:32	11:42
	02/Mar	M3/M4	15:10/19:21	15:28/19:31
	05/Mar	M1	17:06	18:11
	06/Mar	M1	06:55	08:15
	09/Mar	M4	14:22	14:33
	11/Mar	X2/M1	16:11/18:37	16:22/18:51
	12/Mar	M1/M1/M4/M2	11:38/12:09/13:50/21:44	11:50 /12:14/14:08/21:51
	13/Mar	M2	05:49	06:07
	14/Mar	M1	04:23	04:40
	21/Abr	M2/M2/M4/M2	10:17/11:49/15:24/16:55	10:40/11:57/15:45/17:00
	05/Mai	M1/M1/M2	13:45	13:53
22/Jun	M6	17:39	18:23	

4.2 Influência na Ionosfera dos Flares de Classes M e X

No ano de 2015, os flares solares que mais influenciaram a ionosfera foram os de classe M. Na Figura 4.1 são mostrados os resultados referente a Tabela 1 para as regiões brasileiras mencionadas anteriormente, a saber: Boa Vista, São Luís e Cachoeira Paulista. A Figura 4.1 possui a mesma descrição da Figura 3.5, no qual são apresentados o fluxo de Raios-X obtido através do satélite GOES e os parâmetros $fminF$ e $fbEs$ para Boa Vista (linha verde), São Luís (linha azul) e Cachoeira Paulista (linha vermelha).

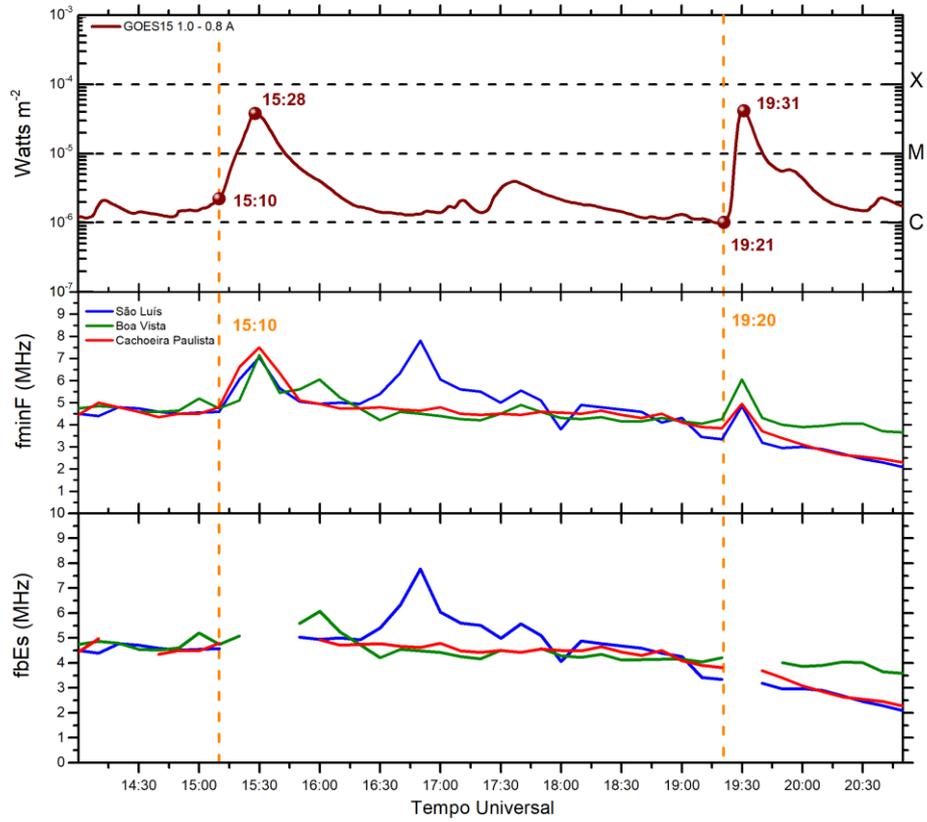
Figura 4.1: Análise do tempo de interação entre flare solar e ionosfera utilizando os parâmetros $fbEs$ e $fminF$ para Boa Vista (linha verde), São Luís (linha azul) e Cachoeira Paulista (linha vermelha).

Janeiro

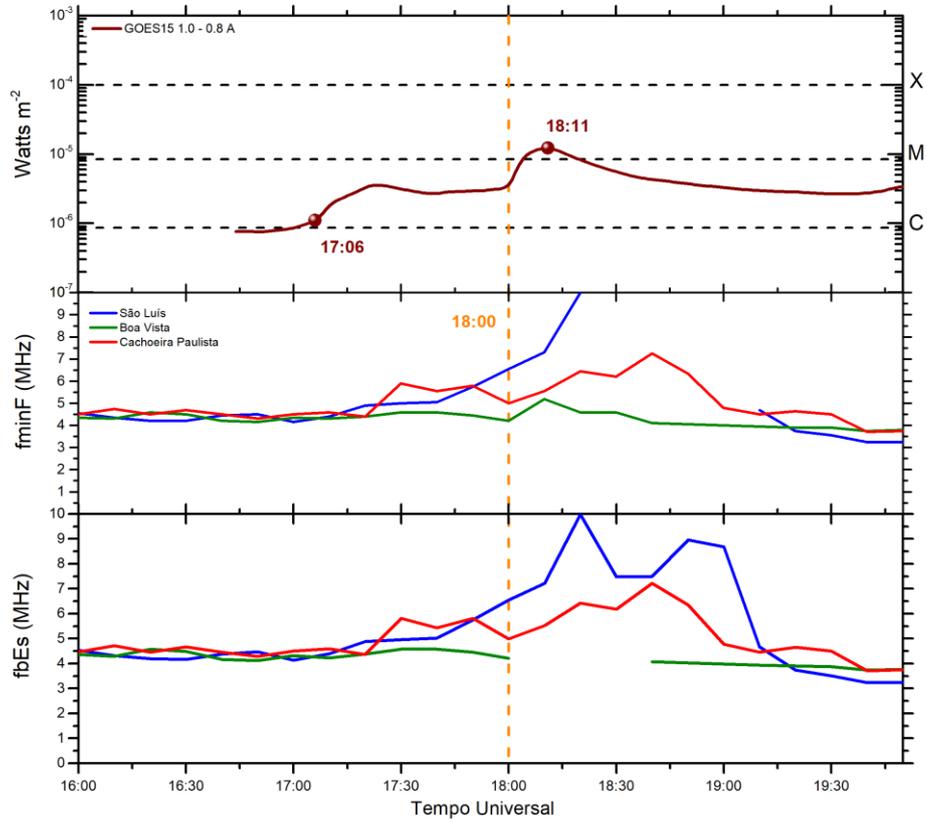


Março

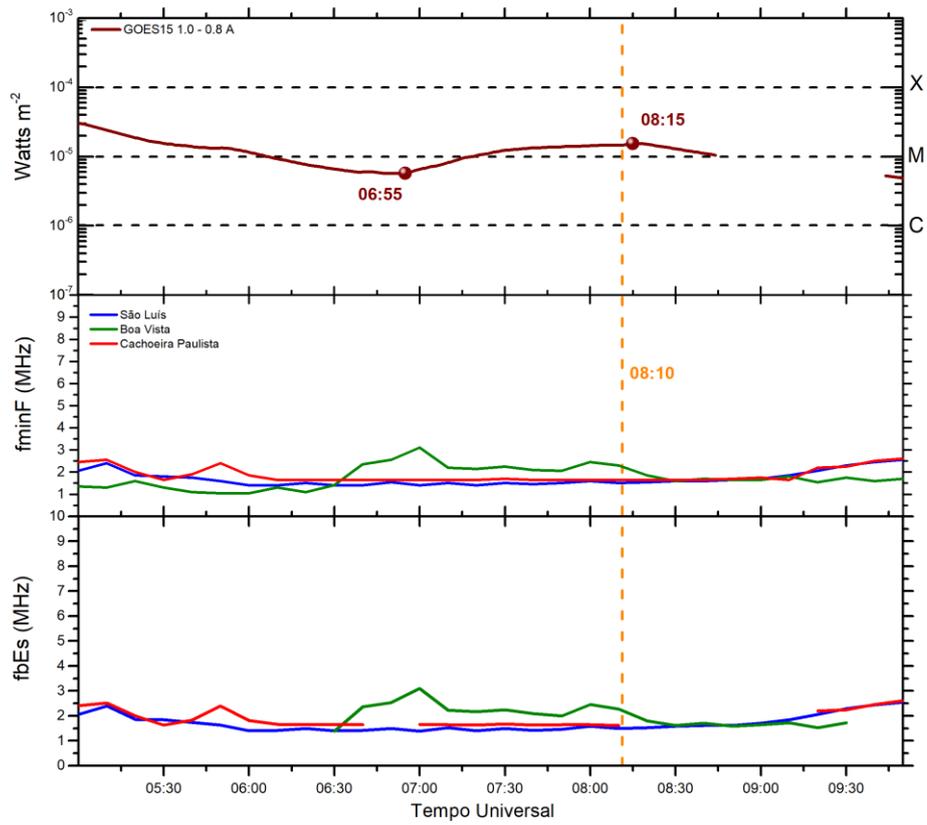
Flare M3 e M4 - 02 de março de 2015



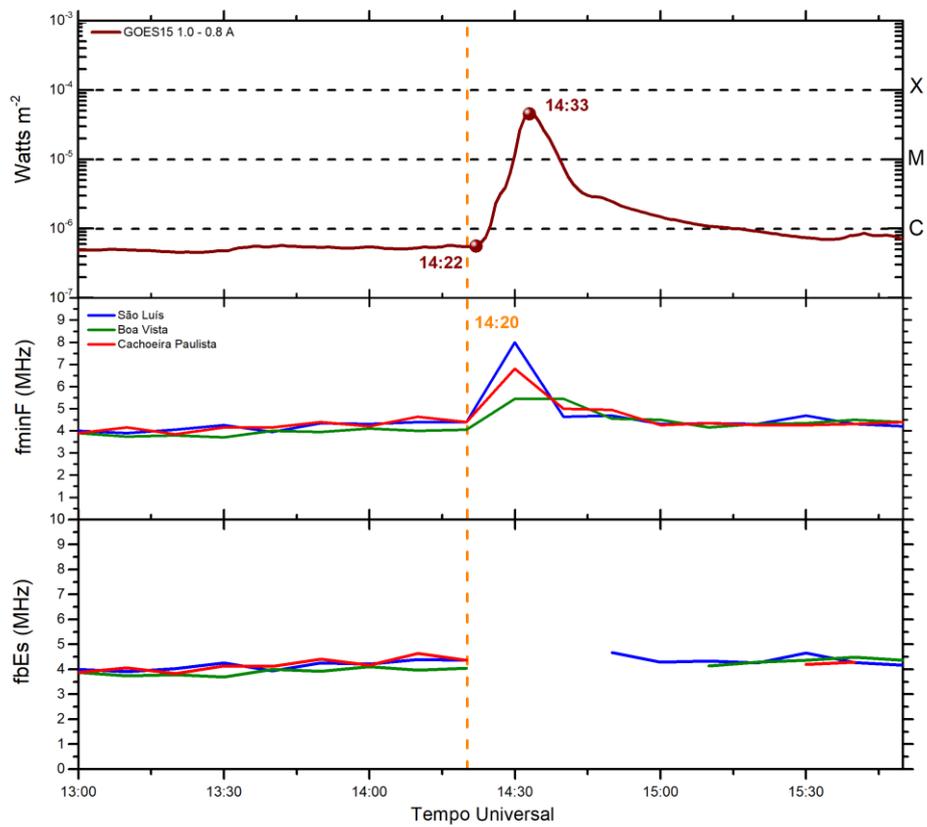
Flare M1 - 5 de março de 2015



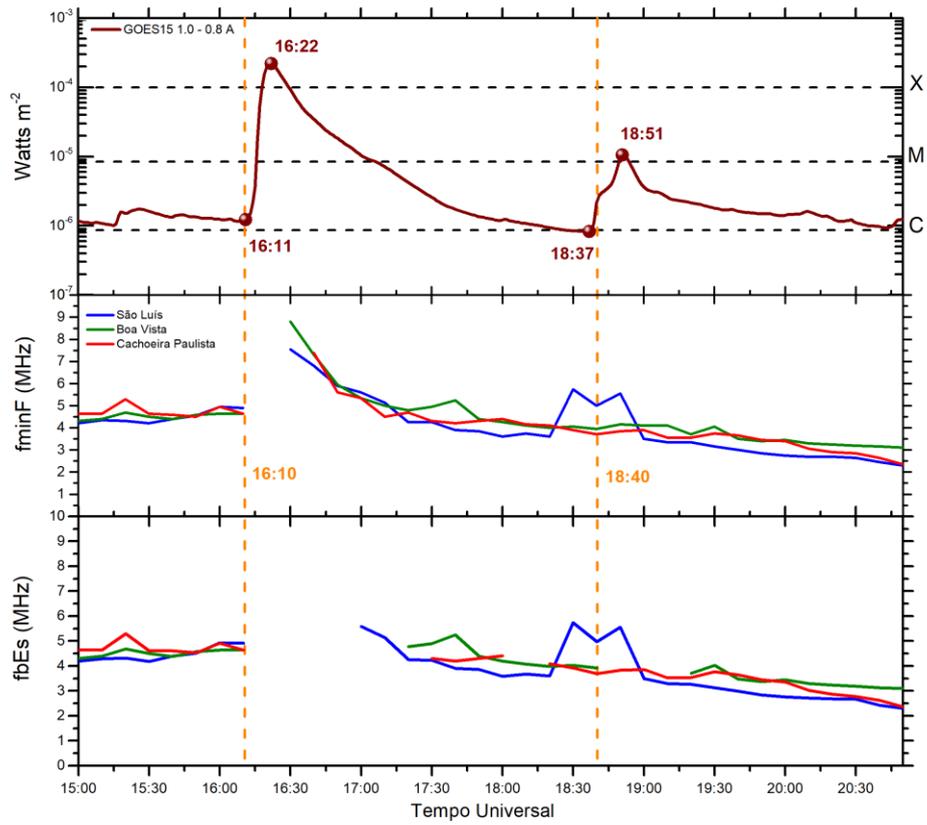
Flare M1 - 06 de março de 2015



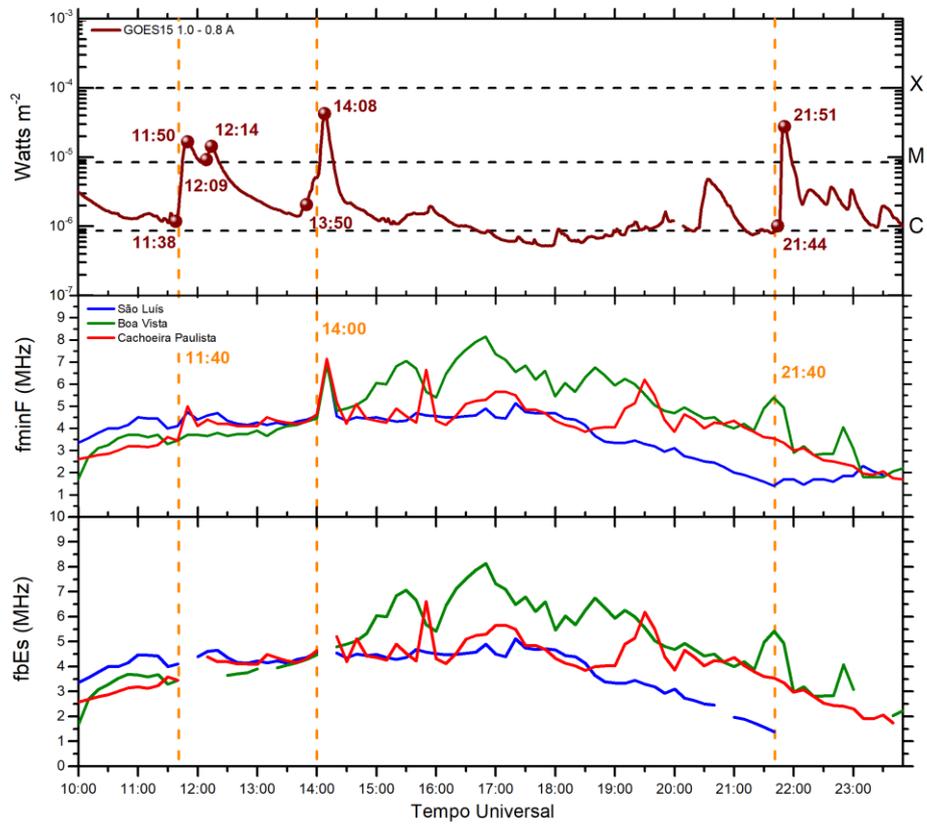
Flare M4 - 09 de março de 2015



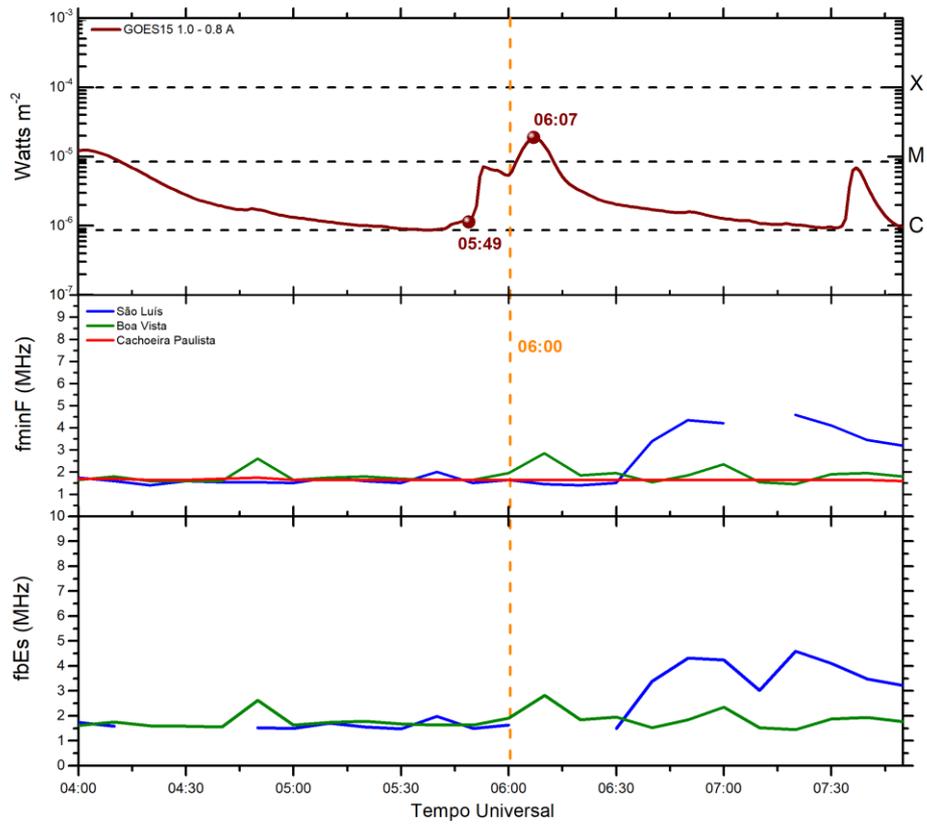
Flare X2 e M1 - 11 de março de 2015



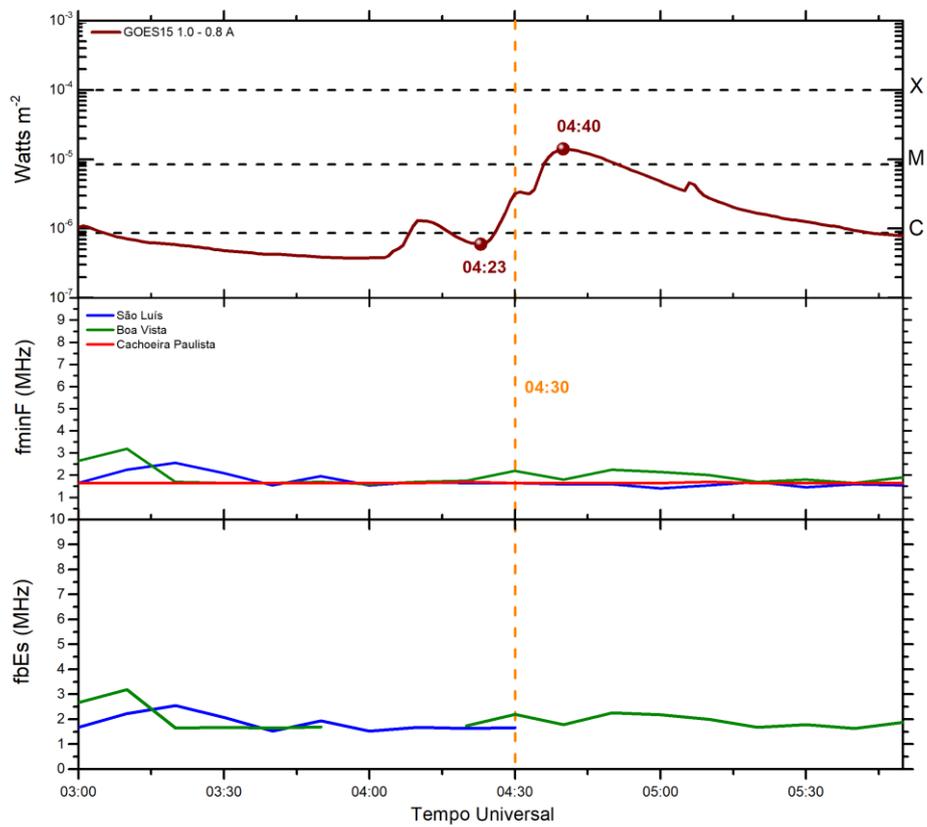
Flare M1, M1, M4 e M2 - 12 de março de 2015



Flare M2 - 13 de março de 2015

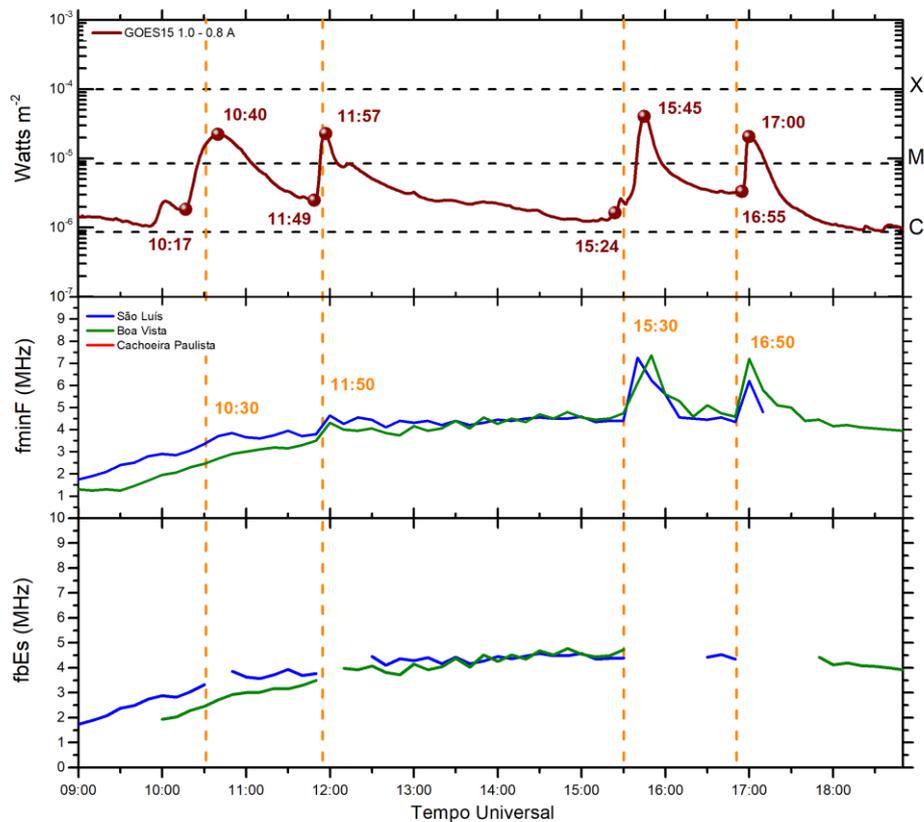


Flare M1 - 14 de março de 2015



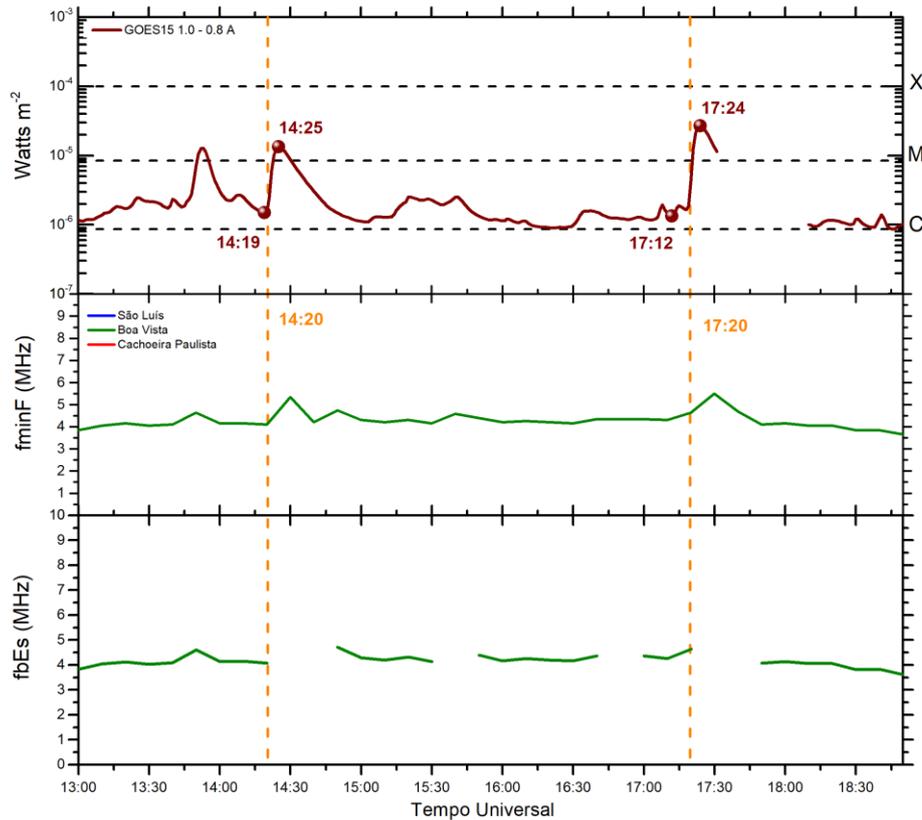
Abril

Flare M2, M2, M4 e M2 - 21 de abril de 2015



Maio

Flare M1 e M2 - 05 de maio de 2015



Em geral, a maioria dos flares solares que ocorreram em 2015 influenciou a ionosfera em pelo menos alguma região brasileira estudada. No dia 29 de janeiro o flare solar de classe M2 começou a acontecer em 1132 UT e a ionosfera já iniciou a sua resposta como observada nos parâmetros ionosféricos obtidos pela digissonda. É notável que o pico em Cachoeira Paulista foi mais expressivo no parâmetro $f_{min}F$, alcançando quase 7 MHz enquanto nas outras regiões não ultrapassam 4 MHz. Em contrapartida, as três regiões sofreram *blackout* como é observado no desaparecimento do parâmetro $fbEs$. O pico do flare ocorreu às 1142 UT e a influência da ionosfera começou às 1130 UT, ou seja, doze minutos antes do pico já era possível observar o efeito do flare solar de classe M2 nas regiões ionosféricas.

Em relação ao dia 02 de março houve dois eventos distintos de flare solares de classe M. O primeiro foi um flare de classe M3 que ocorreu às 1510 UT e influenciou a ionosfera simultaneamente. O pico desse flare ocorreu às 1528 UT, dezoito minutos após a influência na ionosfera. O parâmetro $f_{min}F$ apresentou picos sincronicamente para as três regiões ionosféricas, alcançando 7,5 MHz para Cachoeira Paulista e 6,5 MHz para Boa Vista e São Luís. O desaparecimento do parâmetro $fbEs$ ocorreu para as

três regiões. Contudo, em Boa Vista se mostrou um pouco após em relação às demais estações ionosféricas. O segundo flare desse dia (classe M4) iniciou às 1921 UT e também influenciou a ionosfera concomitantemente. O pico ocorreu dez minutos após (1931 UT). Nesse caso, o pico do *f_{mim}F* foi mais expressivo em Boa Vista, alcançando valores de 6 MHz. Já para Cachoeira Paulista e São Luís, os valores deste parâmetro ficaram em torno de 5 MHz. Apesar da classe do flare ser maior nesse horário, a influência na ionosfera foi menos significativa. Isso pode ocorrer porque o flare de classe M4 ocorreu no período noturno. O desaparecimento do parâmetro *fbEs* ocorreu às 1920 UT para as três regiões, comprovando o evento de *blackout* para as três regiões.

No dia 5 de março ocorreu um flare de classe M1 às 1706 UT que influenciou a ionosfera às 1800UT, ou seja, quase uma hora após o seu início. Contudo, este flare solar influenciou apenas a região de Boa Vista. Em São Luís, houve camadas Es bem expressivas que não permitiram a obtenção do parâmetro *f_{min}F*. Este fato deve ser proveniente de outro fenômeno que não o flare solar. O *fbEs* mostrou-se com frequências superiores a 8MHz que pode ser devido a ocorrência dessas fortes camadas Es. Em Cachoeira Paulista, os parâmetros *f_{min}F* e *fbEs* tem o mesmo comportamento, mostrando que o flare solar de classe M1 não influenciou essa região. Já em Boa Vista, foi observado um pico de aproximadamente 5 MHz e um *blackout* que iniciou às 1800 UT e durou até 1810 UT. Este fato mostra claramente a influência do flare solar em Boa Vista.

O dia 6 de março tem a presença de um evento de flare solar de classe M1 que teve o seu início às 0655 UT e pico às 0815 UT. Para este dia, apenas a região E ionosférica de Cachoeira Paulista foi influenciada tendo o desaparecimento do parâmetro *fbEs* às 0810 UT, cinco minutos antes do pico do flare solar. Neste caso, levou aproximadamente 45 minutos para que o flare começasse a influenciar a ionosfera. O parâmetro *f_{min}F* para as três regiões permanece inalterado com valor de aproximadamente de 2 MHz em Boa Vista, São Luís e Cachoeira Paulista.

Para o evento de flare de classe M4 do dia 9 de março, as três regiões estudadas foram influenciadas. O flare solar teve seu início às 1422 UT e seu pico às 1433 UT. A ionosfera começa a ser influenciada às 1420UT, dois minutos antes do começo do fenômeno. A região de São Luís foi a que sofreu maior interferência, tendo o pico do parâmetro *f_{min}F* com aproximadamente 8 MHz. A região de Cachoeira Paulista foi a segunda mais influenciada com 7 MHz e Boa Vista obteve 6,5 MHz. O parâmetro *fbEs*

desaparece nas três regiões conjuntamente, tendo-se assim características de um evento de *blackout*.

Em relação ao dia 11 de março houve dois eventos, um bem expressivo e um mais ameno. O mais expressivo chegou a ser classificado como classe X e ocorreu às 1611 UT, influenciando a ionosfera no mesmo horário. Seu pico ocorreu às 1622 UT. A principal característica deste evento foi que tanto as camadas Es e a região F foram absorvidas, mostrada na ausência dos parâmetros *fbEs* e *fminF* para as três regiões. O retorno da região F ocorre primeiramente em São Luís e Boa Vista do que Cachoeira Paulista. O segundo evento ocorreu no período noturno, às 1837 UT com o pico em 1851 UT e foi um flare solar de classe M1. Neste horário não houve influência em nenhuma região, uma vez que os dados dos parâmetros *fbEs* e *fminF* são coincidentes neste dia. Note que o fato da ausência do parâmetro *fbEs* em alguns horários para Boa Vista, não significa *blackout* já que não houve um pico simultâneo no parâmetro *fminF*. Apenas houve uma ausência da presença da camada Es.

Já para o dia 12 de março houve quatro eventos de flare solares distintos, 2 de classe M1, um de classe M2 e um de classe M4. Os eventos de classe M1 ocorreram no praticamente no mesmo horário como mostra a figura para este dia. Ele inicia às 1138 UT e tem seu pico às 1150 UT. Em seguida, há um decréscimo do fluxo de Raios-X, 1209 UT e um pico às 1214 UT. Neste caso, houve uma influência significativa em Cachoeira Paulista no parâmetro *fminF*, que alcançou 5 MHz. As outras duas regiões não ocorreram um comportamento com picos aparentes. Contudo, para as três regiões houve *blackouts*, no qual foi mostrado pelo desaparecimento do parâmetro *fbEs*. O evento de classe M2 ocorreu às 2144 UT e influenciou a ionosfera no mesmo horário. O pico ocorreu às 2151 UT. Neste caso, não houve influência em nenhuma das regiões. O parâmetro *fbEs* que desaparece no final do dia em São Luís é devido a ausência da camada Es pelo enfraquecimento do mecanismo de cisalhamento de ventos que as formam. Por fim, o flare de classe M4 ocorre às 1350 UT, com seu pico às 1408 UT. Nesse caso a influência da ionosfera ocorre às 1400 UT, dez minutos após seu início. As três regiões apresentaram um pico significativo no parâmetro *fminEs* de 7 MHz. O parâmetro *fbEs* também desaparece nestas três regiões.

No dia 13 de março houve um flare solar de classe M2 com início às 0549 UT com o seu pico dezoito minutos depois (0607 UT). São Luís foi a única região da ionosfera que foi influenciada, observada pelo parâmetro *fbEs*. Esta influência ocorre no mesmo horário do início do flare solar, onze minutos anterior ao seu pico. O parâmetro *fminF*

para as três regiões continua com seu comportamento típico, indicando que não houve interferências na região F ionosférica.

Para o dia 14 de março houve um evento de flare solar de classe M1. Este evento teve início às 0423 UT e pico às 0440 UT, começando a influenciar a ionosfera sete minutos depois do seu início (0430 UT). Apenas a região de São Luís apresenta o desaparecimento do parâmetro $fbEs$. Contudo, este desaparecimento ocorre durante horas e não é devido ao flare solar. O parâmetro $fminF$ para esta região não apresenta mudanças significativas, revelando ser um caso semelhante ao dia 13 de março. As regiões de Boa Vista e Cachoeira Paulista não apresentam a ausência de $fbEs$. Portanto, não houve fenômeno de *blackout* nessas regiões.

O dia 21 de abril apresenta quatro casos de evento de flare solar. Para este dia há uma ausência dos dados de Cachoeira Paulista e, assim, a análise foi feita apenas para as regiões de Boa Vista e São Luís. O evento de flare solar mais significativo foi o de classe M4 que ocorre às 1524 UT e teve pico em 1545 UT. Este evento provocou alterações na ionosfera nas regiões de São Luís e Boa Vista às 1530 UT, quinze minutos antes do pico do flare. Os parâmetro $fminF$ teve pico nas duas regiões com aproximadamente a mesma frequência (7 MHz). Em São Luís o pico do $fminF$ ocorre próximo às 1540 UT e em Boa Vista ocorre próximo às 1550 UT. O parâmetro $fbEs$ desaparece nas duas regiões de forma simultânea (1530 UT). Os outros três eventos de flare solar recebem a classificação de M2. O primeiro caso de classe M2 ocorreu às 1017 UT com pico em 1040 UT. A ionosfera diante deste fenômeno reagiu às 1030 UT, dez minutos antes do pico e treze minutos depois do início do flare. A região de São Luís apresentou, exclusivamente, uma ausência do parâmetro $fbEs$ e pico de 4 MHz no parâmetro $fminF$. A região de Boa Vista não apresentou alterações. O segundo evento de classe M2 ocorreu às 1149 UT e teve pico às 1157 UT. As regiões de Boa Vista e São Luís foram influenciadas às 1150 UT tendo ausência do parâmetro $fbEs$ e pico do parâmetro $fminF$. O terceiro evento de classe M2 ocorre às 1655 UT e apresenta seu pico às 1700 UT. A ionosfera apresenta alterações nas duas regiões às 1650, cinco minutos antes do começo do flare solar. Neste evento, as regiões de Boa Vista e São Luís apresentam picos do $fminF$ no mesmo instante com frequências diferentes, 7 MHz e 6 MHz, respectivamente. O parâmetro $fbEs$ apresenta ausência nas regiões analisadas caracterizando um evento de *blackout*.

No dia 05 de maio, último gráfico da figura, observa-se dois eventos de flares solares: classes M1 e M2. O flare solar de classe M1 iniciou-se às 1419 UT com o pico às 1425

UT enquanto o flare de classe M2 iniciou-se às 1712 UT com o pico às 1724 UT. Neste dia somente se teve os dados em Boa Vista. Em ambos os casos houve uma influência significativa nesta região, ou seja, ocorreram *blackouts*. No primeiro caso houve um pico no *fminF* e ausência do *fbEs* simultaneamente ao início do flare solar. Já o flare de classe M2 a influência na ionosfera ocorreu oito minutos após.

Finalmente, os dados analisados mostraram que a influência na ionosfera, tanto na camada Es quanto na região F ocorrem antes do pico do flare solar. Já mencionado anteriormente, os flares solares ionizam significativamente a região D ionosférica e, assim, o sinal do radar (digissonda) fica absorvido nesta região (fenômeno SID). Este fato é chamado de *blackout* e prejudica o estudo da ionosfera. Portanto, não é somente o pico do flare que causa alguma influência, uma vez que o sinal já está absorvido em média dez minutos antes dele. Além disso, foi observado que esse tempo de influência do flare depende da sua classe, ou seja, quanto mais intenso o flare solar, menor é o tempo de influência na ionosfera em relação ao seu início. Outro fator importante é a inclinação do dado de flare solar, uma vez quanto mais brusca é a subida até o pico, menor é o tempo de influência em relação ao início. Por fim, conclui-se que flares solares de classes M e X, após o seu início já absorvem o sinal de onda de rádio e os *blackouts* são observados nos ionogramas.

CONCLUSÃO

No período de bolsa, o estudo concentrou-se na realização de um trabalho utilizando uma literatura específica sobre o equipamento de estudo bem como o seu processamento e a análise de dados. O equipamento utilizado para a análise de dados foi a digissonda.

Adicionalmente, foi realizada uma análise qualitativa e quantitativa da relação dos eventos de flares solares e o seu efeito na ionosfera brasileira. Os dados de flares solares utilizados foram os de classes M e X, por afetarem diretamente a ionosfera, obtidos do satélite GOES. Para analisar o seu efeito na ionosfera foi utilizados os ionogramas provindos de digisondas para as regiões de Boa Vista, São Luís e Cachoeira Paulista. O ano de estudo foi o de 2015, totalizando 23 eventos de classes M e X que influenciaram a ionosfera.

O principal objetivo desta análise foi verificar o tempo de efeito dos flares solares nas camadas Es e na região F. De fato, quando ocorre um flare solar de classe M ou X, há uma alta ionização na região D ionosférica e, assim, o sinal da digissonda é absorvido em frequências mais baixas causando o desaparecimento parcial ou total da camada Es e região F. Esse fenômeno é denominado *blackout*. Inicialmente, foi feito um estudo de caso para o dia 22 de junho de 2015, quando houve um flare de classe M. Os resultados mostraram que durante este evento, tanto a camada Es e a região F foram afetadas para as três estações brasileiras. Este fato foi observado através dos parâmetros $fminF$ e $fbEs$, onde ocorre um pico do $fminF$ e ausência do $fbEs$ para as três regiões. Neste dia, o pico do flare de classe M ocorreu às 1823 UT. Contudo, o tempo de resposta dos os parâmetros ionosféricos ocorreu 30 minutos anteriores ao pico.

Para analisar esta resposta mais detalhadamente, foram estudados mais 22 eventos de fenômenos semelhantes ao dia 22 de junho de 2015. Em geral, a maioria dos casos estudados aconteceu ocorrências de *blackouts*. Especificamente, somente 6 eventos não foi observado alguma influência nas regiões ionosféricas. Estes eventos de flares solares que não foi observado *blackouts* foram de classes M1 ou M2.

No restante dos eventos analisados, foi observado que a média do tempo de resposta da ionosfera em relação ao pico do flare solar foi de, aproximadamente, 10 minutos. Em outras palavras, os parâmetros ionosféricos estudados, $fminF$ e $fbEs$, já se eleva e desaparece, respectivamente, antes do flare solar atingir seu valor máximo. Este comportamento foi observado para as três regiões de análise, Boa Vista, São Luís e

Cachoeira Paulista. Portanto, este estudo mostrou que a influência na ionosfera, tanto na camada Es quanto na região F ocorrem antes do pico do flare solar. Assim, o efeito nos parâmetros ionosféricos destas regiões pode ser utilizado como uma ferramenta de previsão, uma vez que os *blackouts* prejudica o estudo da ionosfera. Além disso, foi observado que esse tempo de influência do flare depende da sua classe, ou seja, quanto mais intenso o flare solar, menor é o tempo de influência na ionosfera em relação ao seu início. Outro fator importante é a inclinação do dado de flare solar, uma vez quanto mais brusca é a subida até o pico, menor é o tempo de influência em relação ao início.

Finalmente, com as atividades teóricas e técnicas realizadas nesse período de bolsa, o cronograma do projeto foi cumprido. O estudo dos efeitos dos flares solares na ionosfera é importante para a pesquisa no Clima Espacial e, pretende-se, dar continuidade a este projeto, adquirindo futuramente um novo índice de previsão de flares solares baseados nos resultados desta análise.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Almeida, P. D. S. C. Estudos comparativos de simulações numéricas e análises de dados de perfis de densidades eletrônicas para a região brasileira. Dissertação (Iniciação Científica – Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos – SP, 2006.

Bertoni, F. C. P. Derivas Ionosféricas em latitudes equatoriais: observações e modelagem. Tese (Doutorado – Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos – SP, 2004.

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

Fenwick, R. C., and O. G. Villard (1960), Continuous recordings of the frequency variation of the WWV-20 signal after propagation over a 400 km path, J. Geophys. Res. 65, 3249.

Findlay, J. W., (1951), The phase and group paths of radio waves returned from region E of the ionosphere, J. Atmospheric and Terrest. Phys. 1, 353.

Haldoupis, C., A tutorial review on Sporadic E layers, Aeronomy of the Earth's Atmosphere – Ionosphere. IAGA Book Ser. 29 (2), 381-394, 2011.

Layzer, D., Theory of midlatitude sporadic E, Radio Science., 7, 385-395, 1972.

Piggott, W. R., W. J. G. Beynon, G. M. Brown, and C. G. Little (1957), The measurement of ionospheric absorption, Annals of the IGY, Vol III, Part II (Pergamon Press).

Piggott, W. and Rawer, K.: Handbook of ionogram interpretation and reduction, Edited by US Department of Commerce, 352, 1972.

Ogawa, T. (1958), Frequency variations in short wave propagation, Proc. IRE 46, 1934.

Resende, L. C. A. Estudo do Comportamento dos Parâmetros de Frequência das Camadas E-Esporádicas na Região Equatorial Durante Períodos Perturbados ($DST \leq -100$ NT), Dissertação (Mestrado – Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2010.

Sahai, Y.; Becker-Guedes, F.; Fagundes, P. R.; Lima, W. L. C.; Abreu, A. J.; Guarnieri, F.; Candido, C. M. N.; Pillat, V. G. Unusual ionospheric effects observed during the intense 28 october 2003 solar flare in the Brazilian sector. *Annals Geophysicae*, v. 25, n. 15, p. 2497 – 2502, 2007.

Watts, J. M., and K. Davies (1960), Rapid frequency analysis of fading radio signals, *J. Geophys. Res.* 65, 2295.

Wright, J. W., R. W. Knecht, and K. Davies (1957), *Annals of the IGY*, Vol III, Part I (Pergamon Press).