



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS



**ESTUDO DOS EFEITOS DO CLIMA ESPACIAL NO AMBIENTE
IONOSFÉRICO BRASILEIRO, COM ÊNFASE EM MÉDIAS E BAIXAS
LATITUDES, QUE POSSIBILITEM O DESENVOLVIMENTO DE
FERRAMENTAS DE PREVISÃO DO CLIMA ESPACIAL LOCAL**

**RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA
PIBIC/INPE – CNPq/MCT**

Concedido pelo CNPq em 04/08/2005.

PROCESSO: 105374/2005-2

Laysa Cristina Araújo Resende
(INPE, Bolsista PIBIC/INPE – CNPq/MCT)
E-mail: laysa@dae.inpe.br

Dr. Clezio Marcos De Nardin - (Orientador, DAE/CEA/INPE – MCT)
E-mail: denardin@dae.inpe.br

COLABORADORES

Maria Goreti S. Aquino (DAE/CEA/INPE)
Pedro D. S. C. de Almeida (DAE/CEA/INPE)
Lais Maria Guizelli (DAE/CEA/INPE)

São José dos Campos
Julho de 2008





Dados de Identificação

Bolsista:

Laysa Cristina Araújo Resende

Curso: Licenciatura em Física

ETEP - Faculdades

Orientador:

Dr. Clezio Marcos De Nardin

Divisão de Aeronomia - DAE/CEA/INPE – MCT

Instituto nacional de Pesquisas Espaciais – INPE/MCT

São José dos Campos - SP

Colaboradores:

Maria Goreti S. Aquino – DAE/CEA/INPE - MCT

Local de Trabalho/Execução do Projeto:

O projeto foi desenvolvido na Divisão de Aeronomia (DAE) da Área de Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), sob a orientação do Dr. Clezio Marcos De Nardin, Pesquisador da Divisão.



*“Pesquisa Básica é o que estou fazendo quando eu não sei o que estou fazendo”
Wernher Von Braun*



*Aos meus pais,
Arlindo Resende e
Lucinete Araújo Resende (in memorian),
e ao meu orientador
Dr. Clezio Marcos De Nardin.*



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, por todo o apoio, dedicação e compreensão a fim de realizar um bom trabalho.

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

Aos meus amigos de trabalho, Goreti, Pedro Daniel, Henrique, Ênia, Laís Maria, Ângela, Roberta, Josemar e a todos que contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho.

Em especial, ao meu pai Arlindo Resende, e aos meus irmãos, Arlen Araújo Resende e Matheus Alex Araújo Resende, pelo amor, pelo esforço, pela atenção e por, principalmente acreditar que é possível concretizar um sonho.

Índice

Índice de Tabelas	9
INTRODUÇÃO.....	10
1 – REVISÃO TEÓRICA	11
1.1- RADAR DE ESPALHAMENTO COERENTE EM 50 MHz DO INPE/MCT	11
1.1.1 – Introdução.....	11
1.1.2 – Especificações do Sistema.....	11
1.1.2.1 – Frequência	11
1.1.2.2 – Sistemas Pulsados vs Sistemas de Ondas Contínuas.....	11
1.1.2.3 – Largura de Pulso	12
1.1.2.4 – Frequência de Repetição de Pulso (PRF)	13
1.1.2.5 – Potência de Transmissão	14
1.1.2.6 – Especificações das Antenas.....	14
1.1.2.7 – Especificações dos Transmissores.....	15
1.2- Digissonda	16
1.2.1-Dados Coletados.....	17
1.2.2-Programa de Análise	17
1.3- Magnetômetros	18
2 - ATIVIDADES DE PROCESSAMENTO DE DADOS.....	21
2.1-Classificação dos Dias Selecionados.....	21
2.2-Resultados do Processamento dos Dados Reduzidos pela Digissonda.....	22
2.3-Resultados do Processamento dos Dados Reduzidos pelos Magnetômetros	24
2.3-Processamento dos Dados do Radar RESCO.....	25
3 - ANÁLISE DOS DADOS REDUZIDOS E PUBLICAÇÕES.....	28
3.1-Resultados das Análises dos Dados de São Luís.....	28
3.2 - Discussões dos Resultados	29
3.3 - Publicações dos Resultados Científicos	32
3.3.1 - Participação em Congressos/ Submissão de Resumos.....	32
3.3.2 - Participação em Escolas Internacionais e Cursos	33
4 - CONCLUSÕES.....	35
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	36

Índice de Figuras

Figura 1.1 – Fotografia do Observatório Espacial de São Luís do Maranhão do INPE/MCT, onde se localiza o conjunto de antenas do Radar de Espalhamento Coerente - RESCO.	14
Figura 1.2– Sinal de onda senoidal sendo modulado por uma onda quadrada pulsada.	15
Figura 1.3 - Imagem de uma antena transmissora em São Luís - MA.	16
Figura 1.4 - Imagem de uma antena das receptoras em São Luís - MA.	16
Figura 1.5 - Ilustração gráfica mostrando o perfil da ionosfera no dia 29 de outubro de 2003 em São Luís-MA às 09 h 30 min (UT).	17
Figura 1.6- Ilustração do programa <i>SAO-Explorer</i> onde são visualizadas as diversas telas para manipulação e visualização dos ionogramas e parâmetros ionosféricos.	18
Figura 1.7 – Classificação dos Magnetômetros.	19
Figura 1.8 – Elementos do vetor campo geomagnético.	19
Figura 3.1- Variação da frequência crítica média em relação ao tempo para os períodos calmo e perturbado, nas estações do ano analisadas, obtidos a partir de dados de digissonda no sítio de São Luís- MA.	28
Figura 3.2 - Seqüência de ionogramas obtidos em São Luís - MA (2° 31' S, 44° 16' O) no dia 03 de novembro de 2003 entre 09 h e 13 h 15 min UT. O painel a esquerda mostra os ionogramas obtidos entre 09 h e 11 h UT enquanto o painel a direita mostra os ionogramas entre 11 h 15 min e 13 h 15 min UT.	30
Figura 3.3 - Variação temporal do fbEs e do efeito da corrente do eletrojato equatorial induzida no solo nos dias 02 e 03 de novembro. A linha azul mostra a variação temporal média dos mesmos parâmetros acima para o período calmo de 10 a 12 de outubro.	31



Índice de Tabelas

TABELA 1– Valores de Resolução para a região E	12
TABELA 2– Valores de Resolução para a região F	13

INTRODUÇÃO

No período de bolsa, a aluna realizou as atividades previstas em seu plano de trabalho de acordo com as suas capacidades específicas e com o tempo disponível para o desenvolvimento do projeto.

Neste relatório é apresentada uma descrição das atividades desenvolvidas no período de agosto de 2007 a julho de 2008. A finalidade deste trabalho é qualificar e desenvolver um estudo estatístico sobre o ambiente ionosférico Brasileiro, o qual pode ser de grande utilidade no desenvolvimento de ferramentas para o estudo da ionosfera. Para tanto, atividades de redução de dados, estudos e análise são necessárias. Neste caso, entre outras atividades, foi desenvolvido estudo das presenças de camadas ionosféricas esporádicas em períodos perturbados em São Luís - MA. Foram analisados dados do sondador digital e de magnetômetros, a fim de estudar o comportamento dos dias durante e posteriores a tempestade magnética de 2003. Nesse contexto, as análises encontradas serão submetidas à apresentação do Seminário de Iniciação Científica do INPE (SICINPE 2008).

No capítulo 1 deste relatório serão apresentados trabalhos de revisão teórica que consistem no estudo das instrumentações utilizadas para as análises dos dados. Estes trabalhos tiveram como objetivo o aperfeiçoamento e conhecimento da bolsista sobre os radares sondadores ionosféricos em VHF e em HF. No capítulo 2 apresentaremos um resumo das atividades de processamento de dados. Ainda neste capítulo, estão listadas as publicações destes trabalhos. Além disso, são relatadas as atividades decorrentes ao treinamento básico dos métodos de análise dos dados de radar coerente com os softwares específicos para interpretação a fim de principiar um conhecimento sobre os parâmetros e modos de operação do Radar Coerente RESCO. No capítulo 3 apresentaremos alguns estudos realizados a partir dos dados analisados. E por fim, concluímos este relatório no capítulo 4.

1 – REVISÃO TEÓRICA

Entre os objetivos do projeto, foram incluídos trabalhos teóricos visando o aprimoramento dos conhecimentos da bolsista sobre as instrumentações utilizadas e sobre os conceitos correlacionados com o seu tema de projeto. Estes trabalhos consistiram no estudo sobre o radar de espalhamento coerente em 50 MHz do INPE/MCT e sobre os magnetômetros, e no aprimoramento de conceitos sobre as digissondas. Neste capítulo serão mostrados os aspectos mais importantes relacionados às instrumentações e também uma monografia preparada pela bolsista em relação ao radar (Janardhanan, 1983).

1.1- RADAR DE ESPALHAMENTO COERENTE EM 50 MHz DO INPE/MCT

1.1.1 – Introdução

O sistema do radar Doppler pulsado em VHF (RESCO) foi desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e foi instalado e operado em São Luís-MA com o objetivo de estudar o Eletrojato Equatorial e bolhas de plasma. A análise espectral dos ecos recebidos das irregularidades do eletrojato permite determinar o deslocamento Doppler em frequência e identificar os tipos de espectros que caracterizam as suas irregularidades.

1.1.2 – Especificações do Sistema

Os parâmetros do radar foram escolhidos de acordo com o tipo de estudo a ser conduzido. A seguir, apresentamos de forma resumida a explicação dos parâmetros mais relevantes, bem como as considerações para suas escolhas.

1.1.2.1 – Frequência

A frequência no estudo do Radar Coerente está na área porção inferior da banda VHF. A frequência de operação do radar é um importante parâmetro, pois ela seleciona a escala da irregularidade a ser sondada. Os ecos coerentes de irregularidades são obtidos quando a escala da irregularidade é igual à metade do comprimento de onda correspondente da frequência de operação do radar e resultam na recepção num sinal mais forte. Frequências abaixo de 30 MHz e acima de 54 MHz não podem ser utilizadas, pois entram na faixa do espectro reservado para radiodifusão e TV.

As frequências dos Radares Coerentes funcionam em torno de 50 MHz. Temos os exemplos, o radar de Jicamarca no Peru funciona em 50 MHz, o radar de Boulder nos Estados Unidos em 49,9 MHz, e o radar de Thumba na Índia em 54,95 MHz. Com base nos dados acima, entre outras características desejadas, a frequência de operação escolhida para o Radar RESCO foi 50 MHz.

1.1.2.2 – Sistemas Pulsados vs Sistemas de Ondas Contínuas

O sistema de ondas contínuas é ideal para medir o deslocamento Doppler. Porém, para este radar, também é necessário uma boa medição da altura da fonte e sistemas pulsados podem mais facilmente obter estes dois parâmetros. Existe apenas uma preocupação que tem que ser

observada, que é a Frequência de Repetição de Pulsos (*Pulse Repetition Frequency – PRF*) deverá ser maior que duas vezes o máximo deslocamento esperado.

1.1 2.3 – Largura de Pulso

Num sistema de radar pulsado simples a relação sinal-ruído do eco refletido é proporcional à potência média do radar (Skolnik, 1961). A potência média aumenta com a largura do pulso e com a frequência de repetição de pulsos para uma dada potência de pico. No entanto, a PRF é limitada para evitar ambigüidades nas medidas de altura e, além disso, a largura do pulso é inversamente proporcional à resolução em altura. A resolução de altura é dada pela eq. 1:

$$dh = \text{sen}(\theta)dR + \frac{h}{\text{tg}(\theta)} \quad , \quad (1)$$

na qual

dh é a resolução de altura;

dR é a resolução de distância direta (*range*) = $\frac{c\tau}{2}$, onde τ é a largura de pulso;

θ é o ângulo de elevação do feixe da antena;

h é a altura de observação; e

$d\theta$ é o ângulo do alvo de abertura do feixe (~7°).

A região E possui uma extensão limitada entre 30 e 50 km de altura enquanto a região F possui uma cobertura muito mais larga de altitude. Portanto, para estas regiões, as resoluções de altura (dh) necessitam ser diferentes.

Calculemos, por exemplo, os valores de resolução de altura para a região E. Neste caso, tomemos os valores de $\theta = 60^\circ$ como elevação do feixe do radar e $h = 100$ km como altura de observação. Vamos escolher os valores das larguras de pulsos em 5 μs , 10 μs , 20 μs . Também vamos variar os ângulos de abertura do feixe entre os valores de 3°, 5° e 10°. Através dessas características, podemos obter as diferentes resoluções de altura mostradas na tabela 1, as quais são típicas da região E.

TABELA 1– Valores de Resolução para a região E

Largura de pulso τ (μs)	Ângulos de abertura do feixe $d\phi$ (graus)	Resolução de altura dh (km)
20	10	2,58 + 10 = 12,58
20	5	2,58 + 05 = 07,58
20	3	2,58 + 03 = 05,58
10	10	1,29 + 10 = 11,29
10	5	1,29 + 05 = 06,29
10	3	1,29 + 03 = 04,29
5	10	0,65 + 10 = 10,65
5	5	0,65 + 05 = 05,65
5	3	0,65 + 03 = 03,65

Agora, considerando parâmetros típicos da região F, e assumindo $\theta = 60^\circ$ e $h = 400$ km, obtemos os valores de altura mostrados na tabela 2. Nota que os valores de largura de pulsos devem ser alterados.

TABELA 2– Valores de Resolução para a região F

Largura de pulso τ (μ s)	Ângulos de abertura do feixe $d\phi$ (graus)	Resolução de altura dh (km)
100	10	$12,99 + 40,03 = 53,29$
100	5	$12,99 + 20,15 = 33,14$
100	3	$12,99 + 12,09 = 25,08$
50	10	$06,50 + 40,30 = 46,80$
50	5	$06,50 + 20,15 = 26,65$
50	3	$06,50 + 12,09 = 18,59$
10	10	$01,30 + 40,30 = 41,60$
10	5	$01,30 + 20,15 = 21,45$
10	3	$01,30 + 12,09 = 13,39$

1.1.2.4 – Frequência de Repetição de Pulso (PRF)

A PRF, pelo critério de Nyquist, deve ser maior que duas vezes o máximo deslocamento Doppler esperado. Porém, este parâmetro não pode ser muito alto, pois causaria ambigüidades nas medições de altura. Além disso, as velocidades e as alturas são diferentes para as regiões E e F e, conseqüentemente, as “PRF's” serão diferentes para estas duas regiões.

Uma vez que o radar RESCO opera em 50 MHz, o seu comprimento de onda λ é de:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8}{50 \times 10^6} = \frac{300}{50} = 6\text{m} \quad (2)$$

e assumindo a velocidade máxima de 400 m/s para as irregularidades da região E, o valor máximo do Efeito Doppler é dado por:

$$f_{\text{máx}} = \frac{2V}{\lambda} = \frac{2 \times 400}{6} = 133,3\text{Hz} \quad (3)$$

Portanto, o menor valor da PRF, é 266,6 Hz. Neste exemplo, tomando 120 km como a maior altura de observação da Região E, temos então o máximo range será:

$$\text{Máximo range} = \frac{120}{\cos 30} = 138,56\text{km} \quad (4)$$

Considerando este range, o tempo entre a transmissão do sinal, a excitação da irregularidade e a recepção do eco é de 923,7 μ s, o qual corresponde uma PRF de 1080 Hz.

Relatório Final de Atividades

Para a Região F, assumindo a velocidade máxima de 200 m/s para as irregularidades e tomando 800 km como a sua altura máxima, a “PRF” fica limitada entre 133.4 e 162 Hz. Desta forma, para satisfazer os requisitos dessas regiões, foi escolhida para o radar uma “PRF” variável entre 100 e 1000 Hz.

1.1.2.5 – Potência de Transmissão

A potência do sinal transmitido é importante para estudar as irregularidades com precisão. Uma transmissão de poucos quilowatts que pode ser suficiente para estudar as irregularidades da região E, pode não ser suficiente para estudar as irregularidades da região F. Quando o propósito do Radar é estudar a região F, a transmissão é feita com mais de 100 kW. Como resultado destes requisitos foi escolhido a utilização de oito transmissores de 15 kW, totalizando a potência de 120 kW. Um sistema de 8 transmissores permite que a refrigeração seja feita com ventilação forçada, diminuindo os custos de instalação e operação de radares deste tipo.

Combinado a largura de pulso e PRF, como descrito nas seções anteriores, podemos chegar a um ciclo de operação até 10 % da potência de pico. Consideremos, por exemplo, que o valor da largura de pulso é de 20 μ s e que a PRF é de 500 Hz para a região E. Neste caso, o ciclo de operação seria de 1 %. Tomando agora uma largura de pulso de 100 μ s e uma PRF de 200 Hz, típicos da região F, o ciclo de operação seria de 2%. Assim, a taxa máxima de transmissão foi especificada para 5%. Com este nível de transmissão são esperados bons sinais para a região E e sinais moderados para estudar as irregularidades da região F.

1.1.2.6 – Especificações das Antenas

O Sistema do Radar RESCO possui um arranjo de antenas que é composto por 768 dipolos de cabo coaxial, dispostos no arranjo de 32 x 24, ver Figura 1.1. As 32 antenas estão agrupadas, quatro a quatro, para sua alimentação pelos 8 transmissores. Cada antena consiste de 24 dipolos ligados em série, dois a dois, alinhados no sentido norte-sul, resultando num ganho de 32.5 dB.



Figura 1.1 – Fotografia do Observatório Espacial de São Luís do Maranhão do INPE/MCT, onde se localiza o conjunto de antenas do Radar de Espalhamento Coerente - RESCO.

Fonte: Cortesia de Dr. Clezio Marcos De Nardin.

1.1.2.7 – Especificações dos Transmissores

O Sistema Transmissor do Radar RESCO é composto por dois osciladores, um oscilador de 30 MHz e um oscilador de 80 MHz, dois aparelhos que modulam o pulso, um misturador, um amplificador de 80 MHz, um divisor de potência, oito deslocadores de fase, oito transmissores e oito módulos pré-amplificadores duplexadores.

Os dois osciladores são conectados aos moduladores de pulso que recebem os sinais e os modulam. Este tipo de misturador recebe os sinais pulsados em 80 MHz e 30 MHz e disponibiliza na sua saída à diferença e a soma de frequência entre eles. O sinal de soma é descartado e a diferença, um sinal de 50 MHz, é mandado ao modulador de onda quadrada. Com isso, o sinal resultante, o qual é um sinal de onda senoidal modulado por uma onda quadrada pulsada (veja figura 1.2), é passado para o pré-amplificador de baixa potência. No amplificador o sinal é amplificado e sua saída é conectada ao divisor de potência, onde o sinal é dividido igualmente em oito partes. Este sinal chega aos oito transmissores, onde são conectados individualmente a um módulo pré-amplificador duplexador, que habilita o uso da antena para transmissão e recepção.

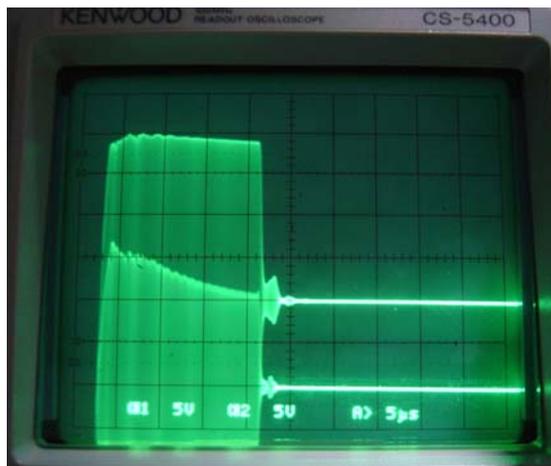


Figura 1.2– Sinal de onda senoidal sendo modulado por uma onda quadrada pulsada.
Fonte: Cortesia de Dr. Clezio Marcos De Nardin.

Compondo também o sistema transmissor, temos a unidade de controle. Esta unidade controla as variáveis do sinal transmitido, sendo a largura de pulso variável de 20 μ s até 100 μ s e taxa de repetição de pulsos variável de 1000 Hz a 50 Hz, correspondendo a um período entre pulsos de 1ms até 20 ms.

1.1.2.8 – Ecos Recebidos e Dados Gravados e Processados

O sinal recebido pelo radar abrange uma distribuição estatística das frequências do efeito Doppler, tanto para o sinal esparramado em um volume extensivo que consiste de um número largo de alvos discretos, como para uma distribuição estatística de velocidades. Para determinar essas frequências é necessária uma análise espectral do sinal recebido. (Greenwald, 1972).

Compondo o sistema de recepção, a mesma unidade que controla a transmissão controla a recepção. Esta unidade é responsável pelas variáveis de controle da recepção, como atenuação exigida pela unidade de aquisição de dados, tempo entre a transmissão do sinal e início da amostragem e número de amostras do sinal recebido.

A unidade de armazenamento dos dados consiste de um circuito de interface e um computador para armazenamento dos dados. Nesta unidade os sinais analógicos dos dois canais, sinais em fase e em quadratura são convertidos em dados digitais de 16 bits para posterior gravação. Ao serem gravados, os dados são colocados no arquivo conforme a ordem que chegam, ou seja, é colocado o sinal em fase, parte real, de uma dada altura, após o sinal em quadratura, parte imaginária desta mesma altura, repetindo-se até que todos os arquivos tenham sido salvos.

Juntamente com os dados é gravado outro arquivo, de nome "RDATA. HDR". Este arquivo contém as informações sobre a taxa de repetição de pulso (IPP), largura de pulso (PW), tempo de atraso (TD), tempo de intervalo (TI), tempo de amostragem (SW), número de pulsos (NP), número de alturas (NG), feixe (BEAM) e tempo de repetição por feixe (RT).

1.2- Digissonda

Sondadores Digitais são radares de alta frequência que consistem de um transmissor e de um sistema receptor com circuitos de detecção dos sinais recebidos e de um sistema de antenas transmissoras e receptoras. O sistema transmissor envia para a ionosfera pulsos muito curtos de energia eletromagnética em frequências variáveis entre 0,5 a 30 MHz com potência de pico da ordem de 10 kW e potência média em torno de 500 W. O sistema receptor registra a intensidade do pulso refletido nas camadas ionosféricas e o tempo decorrido entre a transmissão e a recepção. Nas figuras abaixo são apresentadas fotografias das antenas de transmissão e recepção (figura 1.3 e 1.4, respectivamente) componentes dos sistemas de transmissão e de recepção.



Figura 1.3 - Imagem de uma antena transmissora em São Luís - MA.
Fonte: INPE (2006)



Figura 1.4 - Imagem de uma antena das receptoras em São Luís - MA.
Fonte: INPE (2006)

1.2.1-Dados Coletados

Os dados coletados pela digisonda são, essencialmente, ecos do sinal refletidos pelas camadas ionosféricas. A seqüência destes ecos recebidos, organizados adequadamente, produz o um registrado gráfico denominado ionogramas (Figura 1.5). Um ionograma é gráfico onde são escalonadas as alturas das camadas de reflexão versus a frequência do sinal que foi refletido em cada uma destas camadas. Na Figura 15 também está representado o perfil da ionosfera em São Luís - MA, no dia 29 de outubro de 2003 às 09 h 45 min. Na altura inferior, aproximadamente 110 km, o gráfico mostra a região E. Na faixa de altura que inicia em 90 km podendo chegar até 160 km é possível ocorrer adensamentos do plasma ionosférico. A este adensamento do plasma em uma faixa de altura restrita atribuímos o termo camada ionosférica esporádica. Nas alturas superiores, entre 200 km à 600km, está a região F, subdivida em F1 e F2.

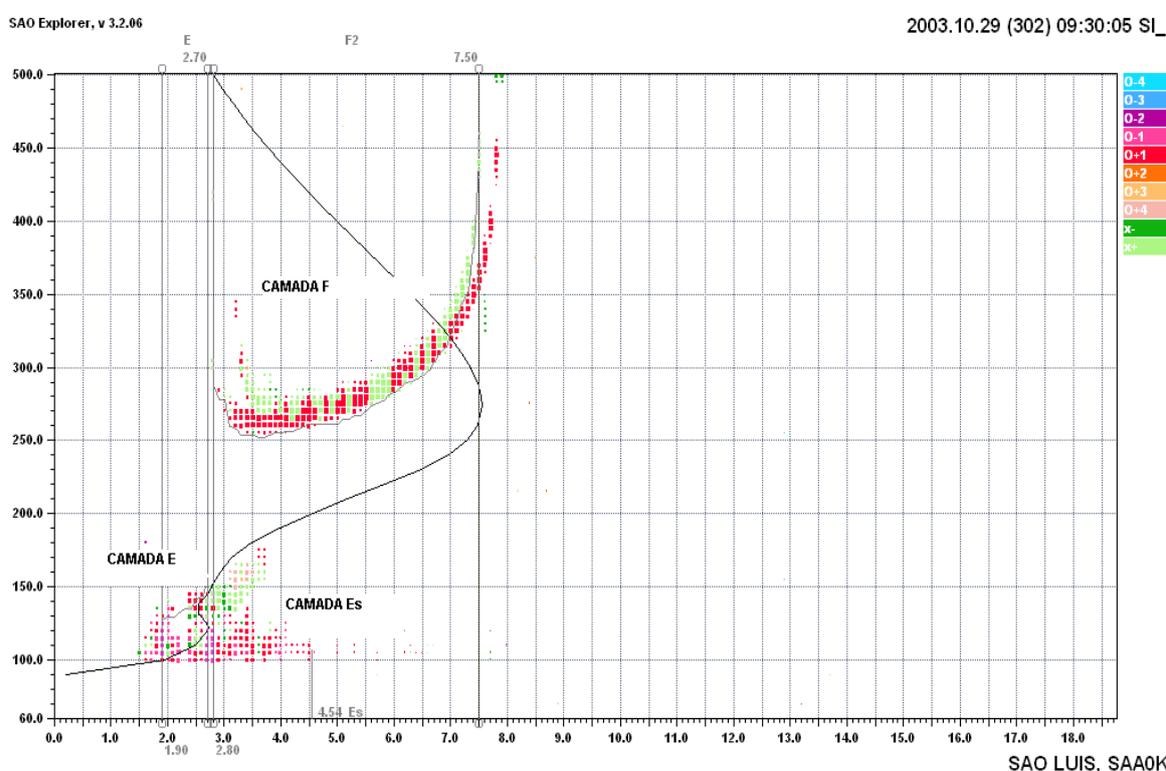


Figura 1.5 - Ilustração gráfica mostrando o perfil da ionosfera no dia 29 de outubro de 2003 em São Luís-MA às 09 h 30 min (UT).

1.2.2-Programa de Análise

O programa de análise utilizado é o *SAO-Explorer* (SAO-X) mostrado na figura 1.6. Este programa é o responsável pela interpretação dos sinais recebidos pelos sistemas receptores e sua posterior organização em forma de ionogramas, doravante denominados dados brutos. Os dados brutos que o grupo de pesquisas em ionosfera da nossa divisão possui estão arquivados em dois formatos básicos. Os dados mais antigos estão encriptados no formato denominado TAP. Este formato contém, além dos dados básicos, a informação da interpretação automática feita pelo programa *Artist*. Modernamente, os dados brutos são encriptados no formato denominado GRM. Neste formato, a interpretação automática é gravada em um arquivo em separado dos dados brutos. Alguns dos parâmetros ionosféricos fornecidos pelo

programa *Artist* a partir do ionograma, os quais são usados para neste projeto estão listados a seguir:

foEs - frequência crítica ou frequência de corte da camada Es. Esta frequência crítica subentende-se a frequência máxima que a camada Es responde.

fbEs - frequência de bloqueio. Quando a camada Es bloqueia o recebimento de ecos de regiões mais altas da ionosfera, a maior frequência que isto ocorre é chamada frequência de bloqueio simbolizada por fbEs.



Figura 1.6- Ilustração do programa SAO-Explorer onde são visualizadas as diversas telas para manipulação e visualização dos ionogramas e parâmetros ionosféricos.

1.3- Magnetômetros

Magnetômetros são equipamentos que medem as componentes do campo magnético. Eles podem ser divididos em dois grupos, como ilustrado na Figura 1.7: os magnetômetros escalares e os magnetômetros vetoriais. Os magnetômetros escalares medem apenas a intensidade do campo magnético. Já os magnetômetros vetoriais, medem a intensidade do campo magnético em cada uma das três direções que formam o vetor campo geomagnético. Entre os magnetômetros escalares podemos citar os magnetômetros de indução, de precessão de prótons e os de bombeamento ótico [Kabata, 2000]. Entre os magnetômetros vetoriais, destacam-se os de efeito Hall, os SQUIDS (*Superconducting Quantum Interference Device*), e os *fluxgates*.

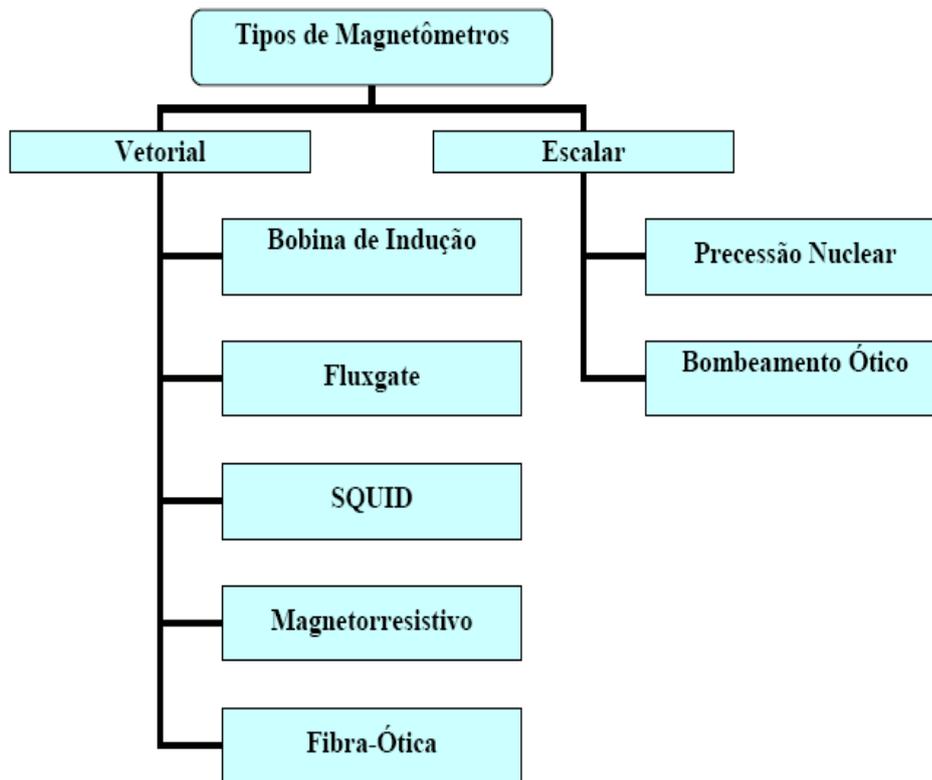


Figura 1.7 – Classificação dos Magnetômetros
Fonte: Siqueira (2008, p. 31)

No OESLZ estão instalados dois magnetômetros do tipo *fluxgate*. Este tipo pode monitorar o campo magnético e suas flutuações nos sistemas mais utilizados: coordenadas geográficas (X, Y, Z) e coordenadas magnéticas (H, D, Z). A Figura 1.8 ilustra o vetor total do Campo Geomagnético para um local no hemisfério norte, o qual é representado pela letra F. Nesta figura também estão ilustradas as componentes deste vetor nos diferentes sistemas, incluindo os elementos lineares e angulares.

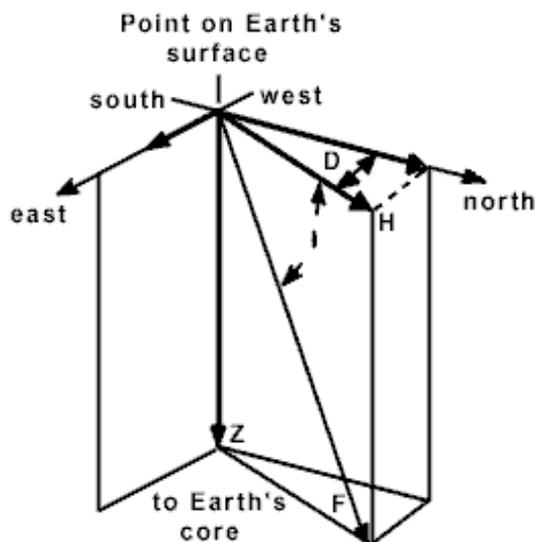


Figura 1.8 – Elementos do vetor campo geomagnético

Os elementos lineares representados na Figura 1.8 são:

- X – componente magnética norte (positiva no sentido do norte geográfico);
- Y – componente magnética leste (positiva para leste);
- Z – componente magnética vertical (positiva quando aponta para baixo);
- H – componente magnética horizontal (define o norte magnético local); e
- F – intensidade total do campo magnético num determinado ponto.

Os elementos angulares são:

- D – declinação magnética. É o ângulo entre o norte geográfico (X) e a componente horizontal do campo magnético (H), positivo quando medido do norte para leste; e
- I – inclinação magnética. É o ângulo entre a componente magnética horizontal (H) e o vetor intensidade total do campo magnético (F), positivo quando medido do plano horizontal para baixo.

O magnetômetro instalado em São Luís tem o objetivo principal de registrar as variações diurnas geomagnéticas relacionadas ao eletrojato equatorial na região brasileira e do ângulo de inclinação magnética, possibilitando investigações experimentais sobre as variações temporais do campo magnético terrestre. Nos estudos realizados no decorrer deste ano de bolsa foi utilizado o instrumento consiste de um sensor tipo *fluxgate* enterrado a 1 m de profundidade numa distância de 60 m do computador de processamento. Este magnetômetro mede as componentes X, Y e Z. A fórmula usada para o cálculo do ângulo DIP (Eq. 5) é baseada nas componentes medidas do magnetômetro. (Chapman e Bartels, 1940)

$$\arccos(I) = \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} \quad (5)$$

Os dados são armazenados em intervalos de 1 segundo. Contudo, a resolução temporal adotada em todos os estudos foi de 1 minuto. Esse decremento na resolução foi obtido através da média do minuto de aquisição.

2 - ATIVIDADES DE PROCESSAMENTO DE DADOS

Neste capítulo vamos apresentar as atividades de coleta e redução de dados relacionados ao relatório e a organização dos dados do Radar RESCO. Foram estudados os perfis ionosféricos obtidos por sondadores digitais relacionadas com os parâmetros de frequência das camadas E e Es. Além disso, foram estudados assinaturas de magnetômetros dos dias 02 e 03 de novembro de 2003, dias após uma tempestade magnética. Este trabalho é uma continuação de um estudo anterior e foi desenvolvido neste projeto do SICINPE 2008.

2.1-Classificação dos Dias Selecionados

Foram considerados dias perturbados antes, durante e posterior à forte tempestade magnética que ocorreu nos dias 29-31 de outubro de 2003, área hachurada da figura 2.1. Esses dias foram classificados de acordo com o índice magnético Dst, um índice geomagnético que monitora o nível de perturbações magnéticas com base em estações ao largo de médias e baixas latitudes. Ele é construído a partir da à média do componente horizontal do campo geomagnético obtido por magnetômetros em latitudes equatoriais e médias ao longo do equador (Rishbeth e Garriott, 1969). Os valores negativos de Dst indicam que uma tempestade magnética está em andamento. Quanto mais negativo o Dst, mais intensa é a tempestade magnética. As deflexões negativas no índice de Dst são causadas pela corrente anelar do tempo da tempestade que flui nos cinturões de radiação de Van Hallen. O gráfico da Figura 2.1 mostra a variação do índice Dst ao longo dos meses de outubro e novembro de 2003.

Neste gráfico é possível verificarmos duas grandes tempestades magnéticas. A primeira ocorreu em 28 de outubro, logo após um período relativamente perturbado que se inicia em torno do dia 14 de outubro. Na fase principal, onde o índice mostra uma queda brusca no valor da sua intensidade, o índice Dst chegou à -370 nT. A fase de recuperação, caracterizada pela subida do índice até atingir os valores quiescentes, parece ter durado até o dia 4 de novembro. A partir deste dia, conforme visto na figura, podem ser observadas outras duas sub-tempestades. Outra forte tempestade ocorreu no dia 20 de novembro.

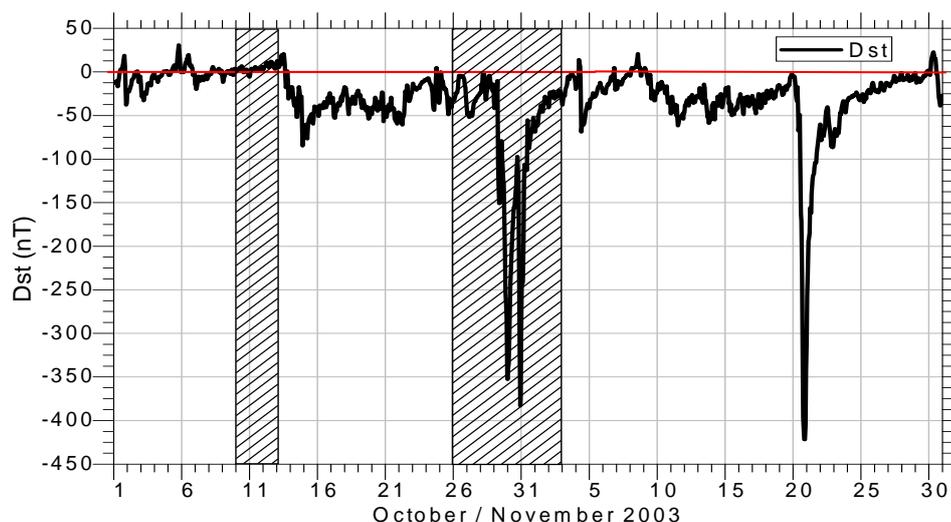


Figura 2.1 – Variação do índice Dst em função dos dias do mês de outubro e novembro de 2003.

2.2-Resultados do Processamento dos Dados Reduzidos pela Digissonda

Os parâmetros utilizados para este estudo são os derivados de frequência relacionadas com a camada Es. Portanto, foram selecionadas as frequências críticas do pico das camadas E e da camada E esporádica (Es). Como já foi mencionado na seção sobre digissonda do capítulo anterior, os parâmetros de frequências de interesse para o nosso trabalho são foEs e fbEs. Como resultados desta atividade de processamento dos dados foram obtidas imagens gráficas, os ionogramas, sobrepostos pelos perfis ionosféricos. A seguir, apresentamos uma seqüência ionogramas (Figura 2.2) como exemplo dos dias reduzidos da região E pela bolsista do ano de 2003.

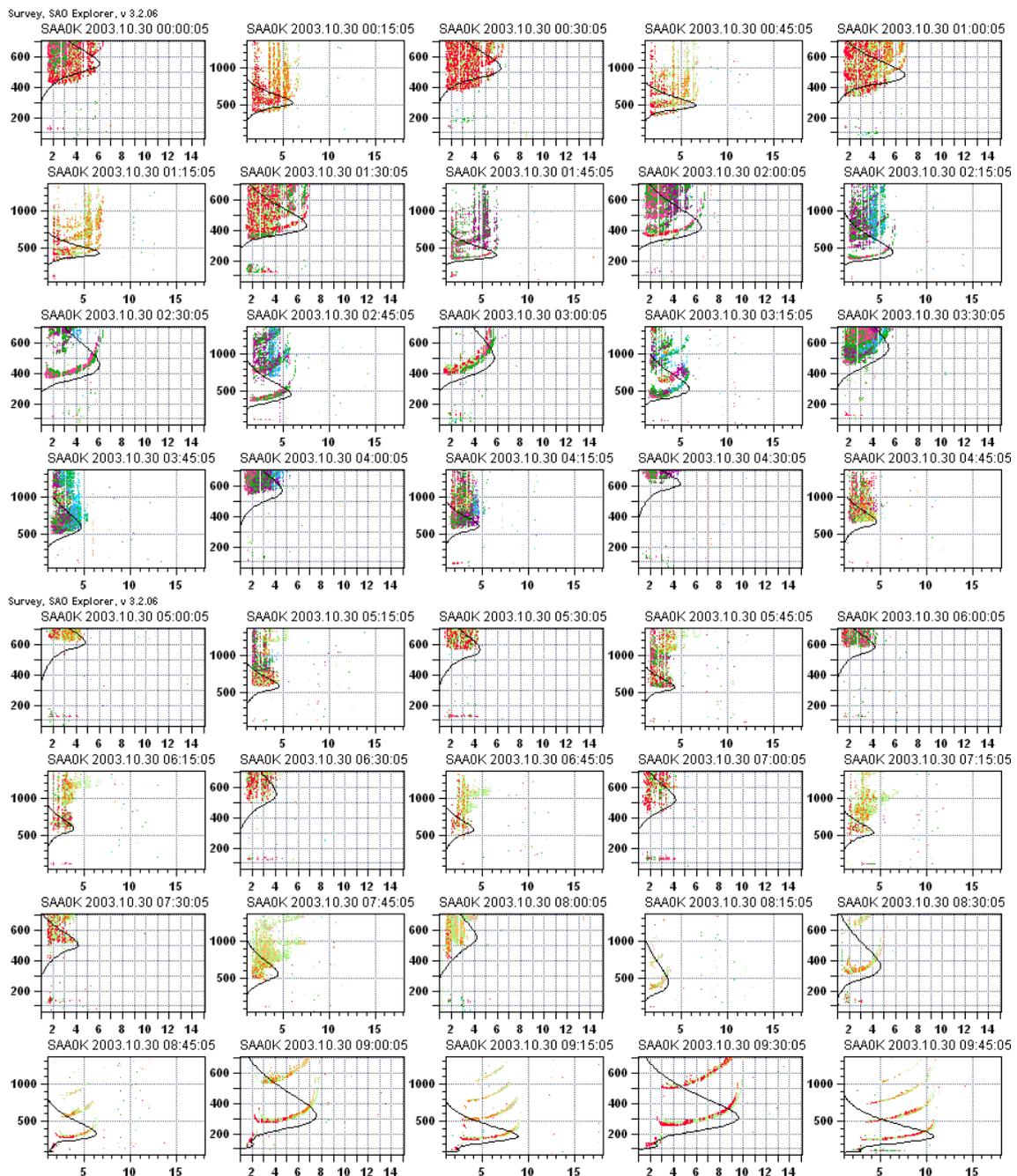


Figura 2.2 (a) - Série de ionogramas obtidos no dia 30 de outubro de 2003 no sítio de São Luís - MA.

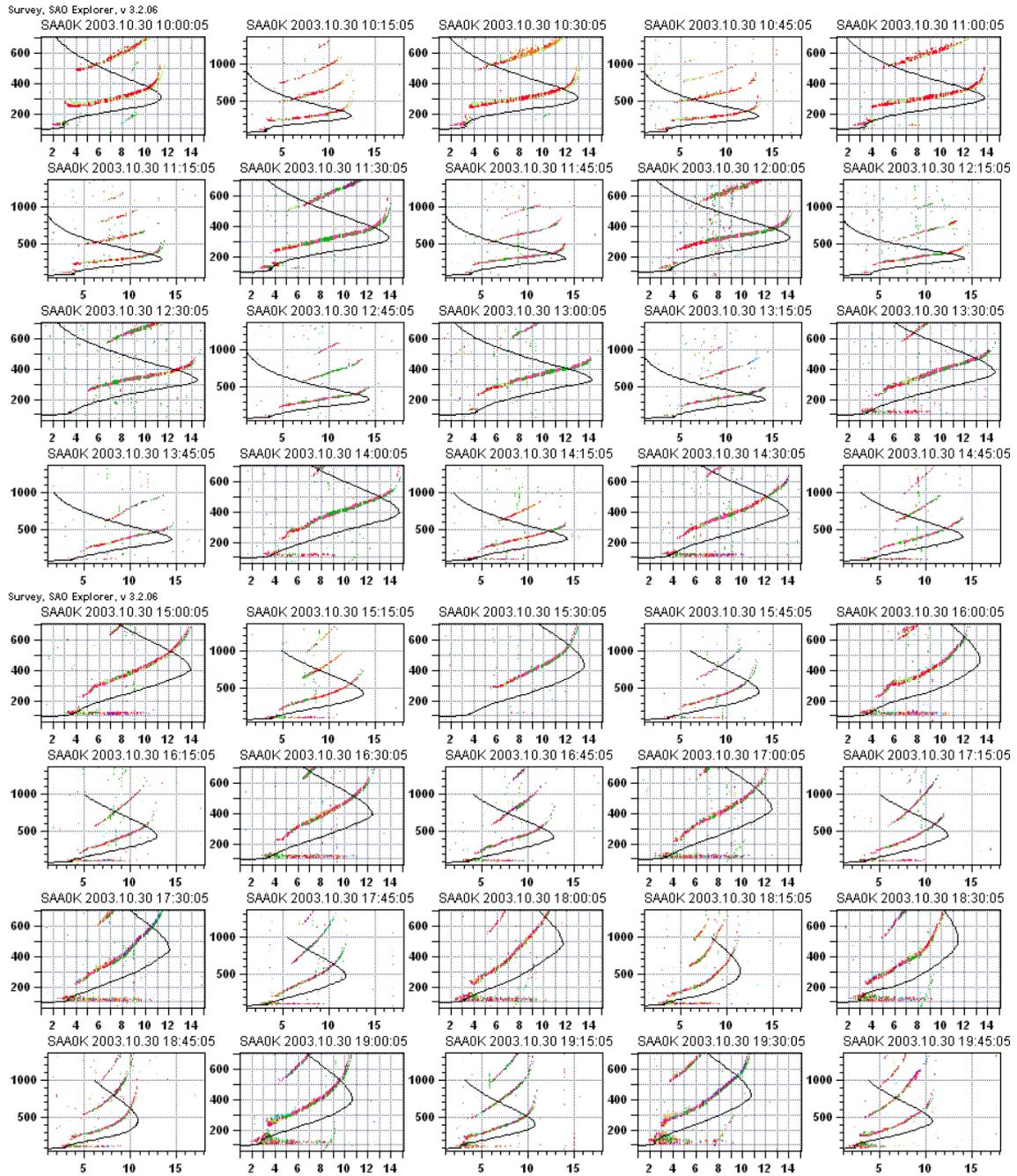


Figura 2.2 (b) - Série de ionogramas obtidos no dia 30 de outubro de 2003 no sítio de São Luís - MA.

Relatório Final de Atividades

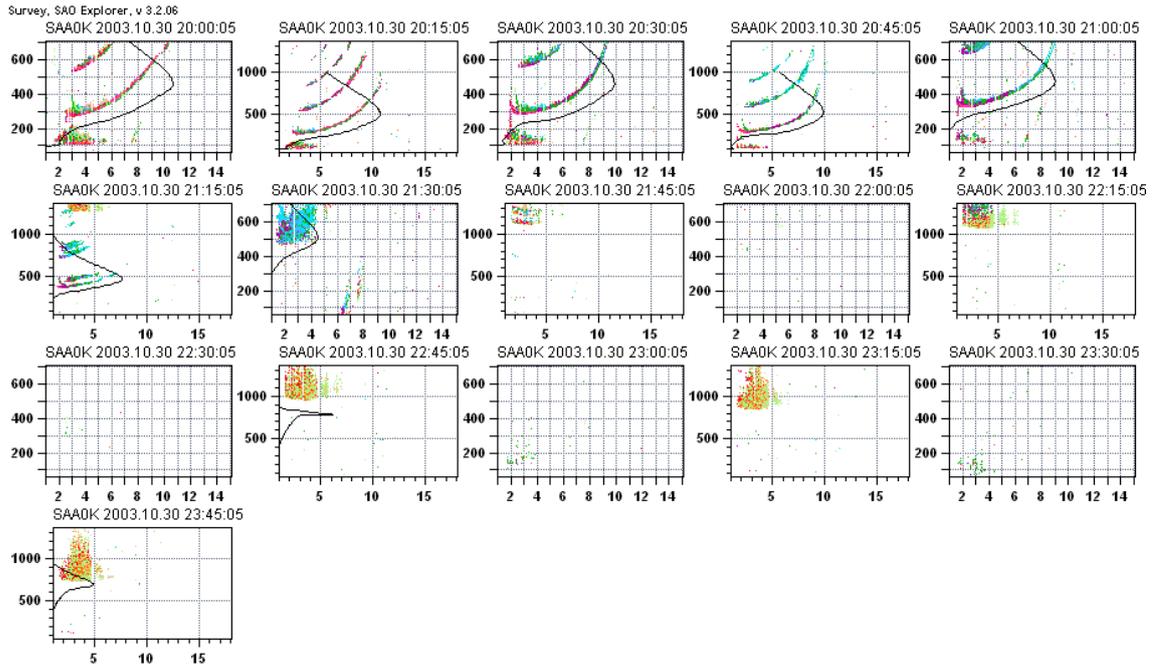


Figura 2.2(c) - Série de ionogramas obtidos no dia 30 de outubro de 2003 no sítio de São Luís - MA.

2.3-Resultados do Processamento dos Dados Reduzidos pelos Magnetômetros

Para a determinação do campo magnético induzido devido à corrente do Eletrojoato Equatorial (EEJ) utilizando magnetômetros é necessário que estes equipamentos estejam instalados em observatórios magnéticos adequadamente localizados. Um observatório deve estar localizado na região de influência do campo magnético do EEJ, como São Luís ($2,33^{\circ}$ S; $44,2^{\circ}$ W; DIP: $-0,5$), e o outro em uma latitude magnética próxima ao primeiro, mas fora da região de influência do EEJ, como em Vassouras ($22,40^{\circ}$ S; $43,65^{\circ}$ W; DIP: $-12,5$). Para este estudo utilizamos a variação diurna da componente H do campo magnético da Terra medida pelos magnetômetros, nos meses de Outubro e de Novembro do ano de 2003, em São Luís (ΔH_{SLZ}), em Vassouras (ΔH_{VSS}).

A Figura 2.3 mostra as variações observadas nas estações e a influência do EEJ em solo obtida pela diferença entre os seus ΔH ($\Delta H_{SLZ} - \Delta H_{VSS}$). Nela podemos visualizar que tanto o ΔH_{SLZ} como o ΔH_{VSS} mostra claramente uma variação caracterizada por um incremento durante o período da manhã em torno do meio dia local e um decréscimo durante a tarde, principalmente no dia 14 de Outubro. Essas variações são típicas do período calmo da região E. Os picos da variação ΔH_{SLZ} ficaram em torno de 100 a 200 nT. Em relação à variação ΔH_{VSS} os picos não ultrapassaram os 100 nT, exceto durante a ocorrência da tempestade magnética. Ambos o ΔH_{SLZ} e o ΔH_{VSS} também mostram uma modulação no valor da linha de base, facilmente visualizado nos dados dos dias anteriores a 14 de Outubro.

Antes de realizar o cálculo do ΔH_{EEJ} , deve ser levada em consideração uma análise cuidadosa a fim de aplicar algumas correções latitudinais para evitar os efeitos das diferenças entre os valores absolutos e da corrente Sq do EEJ. Uma vez que não é possível remover completamente à corrente Sq, o campo magnético induzido pode ser um indicativo da variação da intensidade da corrente EEJ.

Relatório Final de Atividades

Levando em conta a discussão anterior, podemos verificar que o padrão de variação mostra uma característica específica, parecido com o comportamento das batidas de um coração. A excursão da amplitude positiva ao longo do dia normalmente possui valores de 60-100 nT durante um período calmo, enquanto as excursões negativas não ultrapassam os -40 nT. Os valores positivos e maiores durante o dia são causados pela indução da corrente do EEJ, a qual é também maior durante o dia. À noite, a corrente do EEJ se inverte, pois o campo elétrico também se inverte. Esta corrente também é menor durante a noite porque temos menos ionização e, portanto, temos menor condutividade.

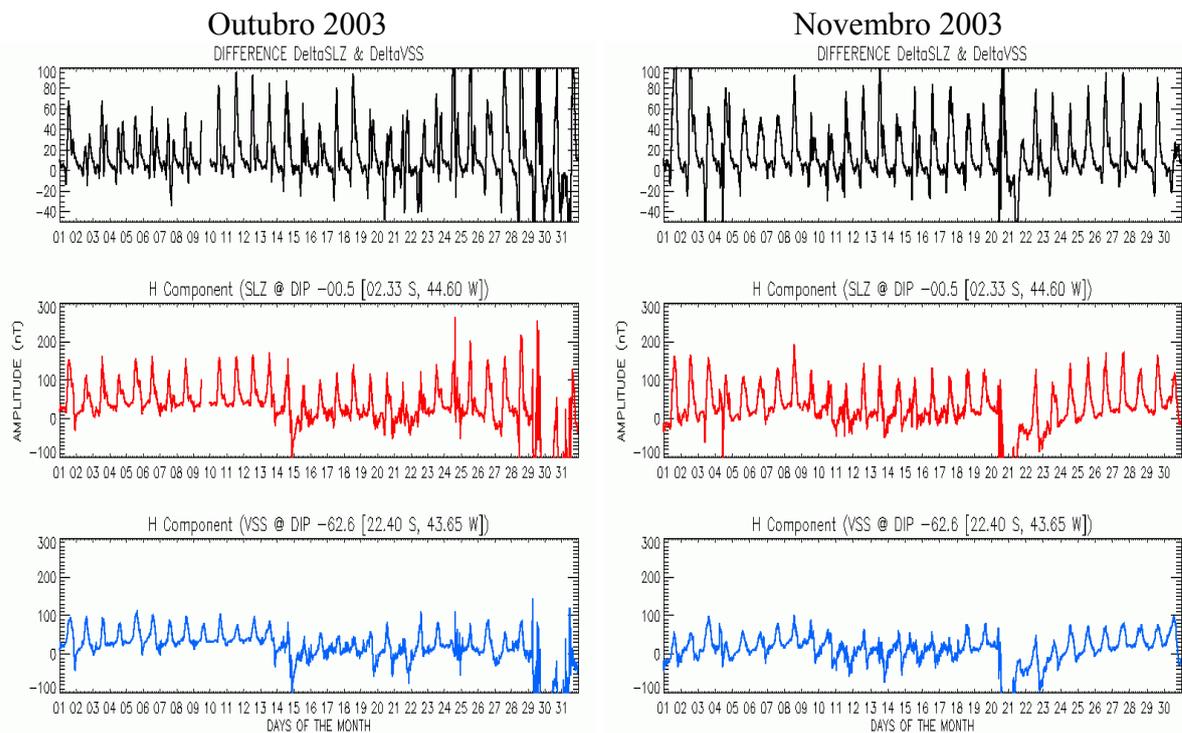


Figura 2.3- Parâmetros ΔH_{EEJ} (painel superior), ΔH_{SLZ} (painel central) e ΔH_{VSS} (painel inferior) para outubro e novembro de 2003.

Nos dias 14 de outubro as variações ΔH_{SLZ} e o ΔH_{VSS} mostram uma reação evidente de uma tempestade magnética em direção ao campo magnético da Terra. Contudo, o EEJ não se mostra muito diferente neste período. Todavia, evidências mais fortes começam a aparecer no dia 25 de outubro ultrapassando os limites superiores da escala.

Durante o período perturbado, dia 29-31 de outubro, no qual ocorre a tempestade magnética, pode ser notado que o parâmetro ΔH_{EEJ} apresenta variações bruscas de amplitude. Estas variações continuam nos dias após a tempestade, 01-03 de novembro. A partir deste período o parâmetro ΔH_{EEJ} volta ao seu comportamento característico de dias calmos.

2.3-Processamento dos Dados do Radar RESCO

Foi dada a continuidade a atividade de organização, catalogação e preparação para o processamento *off line* dos dados brutos do radar de retro-espalhamento RESCO instalado em São Luís - MA (2°31' S, 44°16' O). Nesta etapa foram selecionados os anos de 2001 e 2004. Foi utilizado o mesmo método, que consistiu no desenvolvimento de uma planilha de dados contendo as informações dos feixes leste, oeste e vertical. O processamento nas rotinas foi

Relatório Final de Atividades

desenvolvido no software *Interactive Data Language* (IDL[®]). A figura 2.4 mostra um exemplo dessa planilha para o feixe leste. As colunas são seguidas respectivamente: data do dia em que o radar operou, número de diretórios de dados; número de canais da placa de inquirição; início da operação; resolução temporal; número de interrupções.

2001_RESCO_West.imf - Bloco de notas						
Arquivo Editar Formatar Exibir Ajuda						
Date [AAAAMDD]	Nr. dirs	Nr. Chans	Turn On [hh:mm:ss]	Data Resol [s]	Data Att [dB]	Data Gaps
20010110	04	2	14:58:00	06.00000	[53, 50, 53, 50, 00, 00, 00, 00, 00]	[000, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000]
20010111	10	2	08:25:00	06.00000	[50, 50, 50, 53, 56, 59, 56, 53, 50, 47]	[014, 009, 029, 001, 000, 000, 000, 000, 000, 000]
20010112	05	2	09:25:00	12.00000	[50, 53, 56, 53, 50, 00, 00, 00, 00, 00]	[001, 001, 003, 003, 000, 000, 000, 000, 000, 000]
20010113	04	2	08:31:00	12.00000	[50, 50, 50, 50, 00, 00, 00, 00, 00, 00]	[002, 001, 003, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000]
20010114	09	2	09:12:00	12.00000	[50, 50, 53, 56, 59, 56, 53, 50, 50, 00]	[000, 005, 001, 001, 001, 001, 001, 004, 000, 000]
20010115	07	2	09:29:00	12.00000	[50, 53, 56, 53, 50, 50, 50, 00, 00, 00]	[000, 001, 001, 005, 005, 001, 000, 000, 000, 000]
20010116	05	2	09:50:00	12.00000	[50, 53, 56, 53, 50, 00, 00, 00, 00, 00]	[000, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000]
20010117	03	2	09:13:00	12.00000	[50, 53, 50, 00, 00, 00, 00, 00, 00, 00]	[000, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000]
20010118	02	2	17:05:00	12.00000	[62, 59, 00, 00, 00, 00, 00, 00, 00, 00]	[000, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000]
20010119	01	2	08:25:00	12.00000	[50, 00, 00, 00, 00, 00, 00, 00, 00, 00]	[000, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000]
20010120	03	2	09:57:00	12.00000	[50, 50, 50, 00, 00, 00, 00, 00, 00, 00]	[006, 128, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000]
20010121	01	2	11:19:00	12.00000	[53, 00, 00, 00, 00, 00, 00, 00, 00, 00]	[000, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000]
20010122	07	2	08:50:00	12.00000	[50, 53, 53, 56, 59, 56, 50, 00, 00, 00]	[036, 002, 000, 000, 001, 002, 000, 000, 000, 000]
20010123	10	2	08:05:00	12.00000	[53, 50, 53, 50, 53, 59, 62, 59, 56, 50]	[001, 002, 002, 000, 002, 000, 000, 000, 000, 000]
20010124	09	2	07:57:00	12.00000	[50, 53, 50, 50, 53, 56, 59, 56, 50, 00]	[001, 001, 003, 004, 001, 000, 001, 001, 000, 000]
20010126	08	2	07:55:00	12.00000	[50, 53, 56, 59, 50, 56, 53, 50, 00, 00]	[000, 000, 000, 000, 029, 000, 000, 000, 000, 000]
20010129	06	2	08:02:00	12.00000	[50, 53, 56, 59, 56, 50, 00, 00, 00, 00]	[000, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000]
20010130	07	2	08:00:00	12.00000	[50, 53, 56, 59, 56, 53, 50, 00, 00, 00]	[000, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000]
20010131	03	2	08:04:00	12.00000	[50, 53, 56, 00, 00, 00, 00, 00, 00, 00]	[000, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000]
20010201	06	2	08:06:00	12.00000	[50, 50, 56, 59, 56, 53, 00, 00, 00, 00]	[001, 008, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000]
20010202	07	2	08:07:00	12.00000	[50, 53, 56, 59, 56, 53, 50, 00, 00, 00]	[000, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000]
20010205	06	2	08:02:00	12.00000	[50, 50, 53, 56, 53, 50, 00, 00, 00, 00]	[008, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000]
20010206	05	2	07:51:00	12.00000	[50, 56, 53, 56, 50, 00, 00, 00, 00, 00]	[000, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000]
20010207	05	2	08:04:00	12.00000	[53, 56, 53, 56, 53, 00, 00, 00, 00, 00]	[000, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000]
20010208	06	2	08:10:00	12.00000	[59, 56, 50, 50, 53, 50, 00, 00, 00, 00]	[000, 001, 003, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000]
20010209	07	2	08:08:00	12.00000	[56, 59, 56, 50, 50, 53, 50, 00, 00, 00]	[000, 000, 001, 041, 000, 000, 000, 000, 000, 000]
20010212	08	2	09:15:00	12.00000	[50, 53, 65, 62, 59, 56, 53, 50, 00, 00]	[000, 036, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000]
20010213	05	2	07:50:00	12.00000	[50, 53, 59, 56, 50, 00, 00, 00, 00, 00]	[000, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000]
20010214	05	2	08:02:00	12.00000	[50, 50, 50, 56, 50, 00, 00, 00, 00, 00]	[031, 032, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000]
20010215	05	2	07:58:00	12.00000	[50, 50, 50, 56, 50, 00, 00, 00, 00, 00]	[001, 000, 058, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000]
20010430	04	2	07:52:00	12.00000	[50, 50, 50, 50, 00, 00, 00, 00, 00, 00]	[001, 156, 026, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000]
20010502	03	2	11:14:00	12.00000	[50, 50, 50, 00, 00, 00, 00, 00, 00, 00]	[087, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000]
20010503	04	2	07:45:00	12.00000	[50, 50, 50, 50, 00, 00, 00, 00, 00, 00]	[030, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000]
20010504	03	2	08:25:00	12.00000	[53, 53, 50, 00, 00, 00, 00, 00, 00, 00]	[031, 001, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000]
20010507	01	2	16:17:00	12.00000	[50, 00, 00, 00, 00, 00, 00, 00, 00, 00]	[000, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000]
20010508	03	2	12:28:00	12.00000	[53, 53, 50, 00, 00, 00, 00, 00, 00, 00]	[042, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000]
20010509	02	2	13:26:00	12.00000	[50, 53, 00, 00, 00, 00, 00, 00, 00, 00]	[002, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000]
20010511	02	2	07:24:00	12.00000	[50, 50, 00, 00, 00, 00, 00, 00, 00, 00]	[000, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000]
20010605	03	2	07:18:00	12.00000	[50, 50, 50, 00, 00, 00, 00, 00, 00, 00]	[026, 001, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000]
20010606	04	2	07:54:00	12.00000	[50, 50, 50, 50, 00, 00, 00, 00, 00, 00]	[115, 004, 006, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000]
20010607	03	2	07:49:00	12.00000	[50, 50, 50, 00, 00, 00, 00, 00, 00, 00]	[000, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000]
20010608	05	2	09:18:00	12.00000	[50, 50, 50, 50, 50, 00, 00, 00, 00, 00]	[078, 002, 001, 025, 000, 000, 000, 000, 000, 000]
20010611	04	2	07:43:00	12.00000	[50, 56, 53, 50, 00, 00, 00, 00, 00, 00]	[000, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000]
20010612	04	2	07:39:00	12.00000	[50, 50, 50, 50, 00, 00, 00, 00, 00, 00]	[038, 022, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000]
20010613	03	2	07:09:00	12.00000	[50, 50, 50, 00, 00, 00, 00, 00, 00, 00]	[002, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000]
20010620	03	2	07:56:00	12.00000	[50, 50, 50, 00, 00, 00, 00, 00, 00, 00]	[000, 003, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000]
20010621	03	2	07:28:00	12.00000	[50, 50, 50, 00, 00, 00, 00, 00, 00, 00]	[002, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000]
20010820	02	2	08:44:00	12.00000	[50, 50, 00, 00, 00, 00, 00, 00, 00, 00]	[000, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000]
20010821	03	2	08:10:00	12.00000	[50, 50, 50, 00, 00, 00, 00, 00, 00, 00]	[005, 126, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000]
20010822	03	2	14:08:00	12.00000	[50, 50, 50, 00, 00, 00, 00, 00, 00, 00]	[002, 009, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000]
20010823	03	2	08:28:00	12.00000	[50, 50, 50, 00, 00, 00, 00, 00, 00, 00]	[001, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000]
20010824	04	2	07:40:00	12.00000	[50, 50, 50, 50, 00, 00, 00, 00, 00, 00]	[013, 001, 001, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000]
20010827	02	2	07:44:00	12.00000	[50, 50, 00, 00, 00, 00, 00, 00, 00, 00]	[001, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000]
20010828	03	2	07:49:00	12.00000	[50, 50, 50, 00, 00, 00, 00, 00, 00, 00]	[001, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000]
20010829	03	2	07:45:00	12.00000	[50, 50, 50, 00, 00, 00, 00, 00, 00, 00]	[054, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000]
20010830	03	2	07:58:00	12.00000	[50, 50, 50, 00, 00, 00, 00, 00, 00, 00]	[042, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000]
20010831	03	2	07:46:00	12.00000	[50, 50, 50, 00, 00, 00, 00, 00, 00, 00]	[058, 029, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000]
20011213	00	2	00:00:00	12.00000	[00, 00, 00, 00, 00, 00, 00, 00, 00, 00]	[000, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000]
20011214	00	2	00:00:00	12.00000	[00, 00, 00, 00, 00, 00, 00, 00, 00, 00]	[000, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000]
20011215	00	2	00:00:00	12.00000	[00, 00, 00, 00, 00, 00, 00, 00, 00, 00]	[000, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000]
20011216	00	2	00:00:00	12.00000	[00, 00, 00, 00, 00, 00, 00, 00, 00, 00]	[000, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000]
20011217	00	2	00:00:00	12.00000	[00, 00, 00, 00, 00, 00, 00, 00, 00, 00]	[000, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000]
20011218	00	2	00:00:00	12.00000	[00, 00, 00, 00, 00, 00, 00, 00, 00, 00]	[000, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000]

Figura 2.4- Exemplo de uma planilha de organização feita para o feixe leste do ano de 2001.

Estes arquivos de catálogos são importantes para o correto processamento dos dados, os quais serão automaticamente armazenados nos diretórios mostrados na figura 2.5. Esta

Relatório Final de Atividades

separação dos arquivos em binários, cabeçalho, imagens e parâmetros é feita durante o processamento dos dados pelo programa desenvolvido pelo nosso grupo de pesquisas.

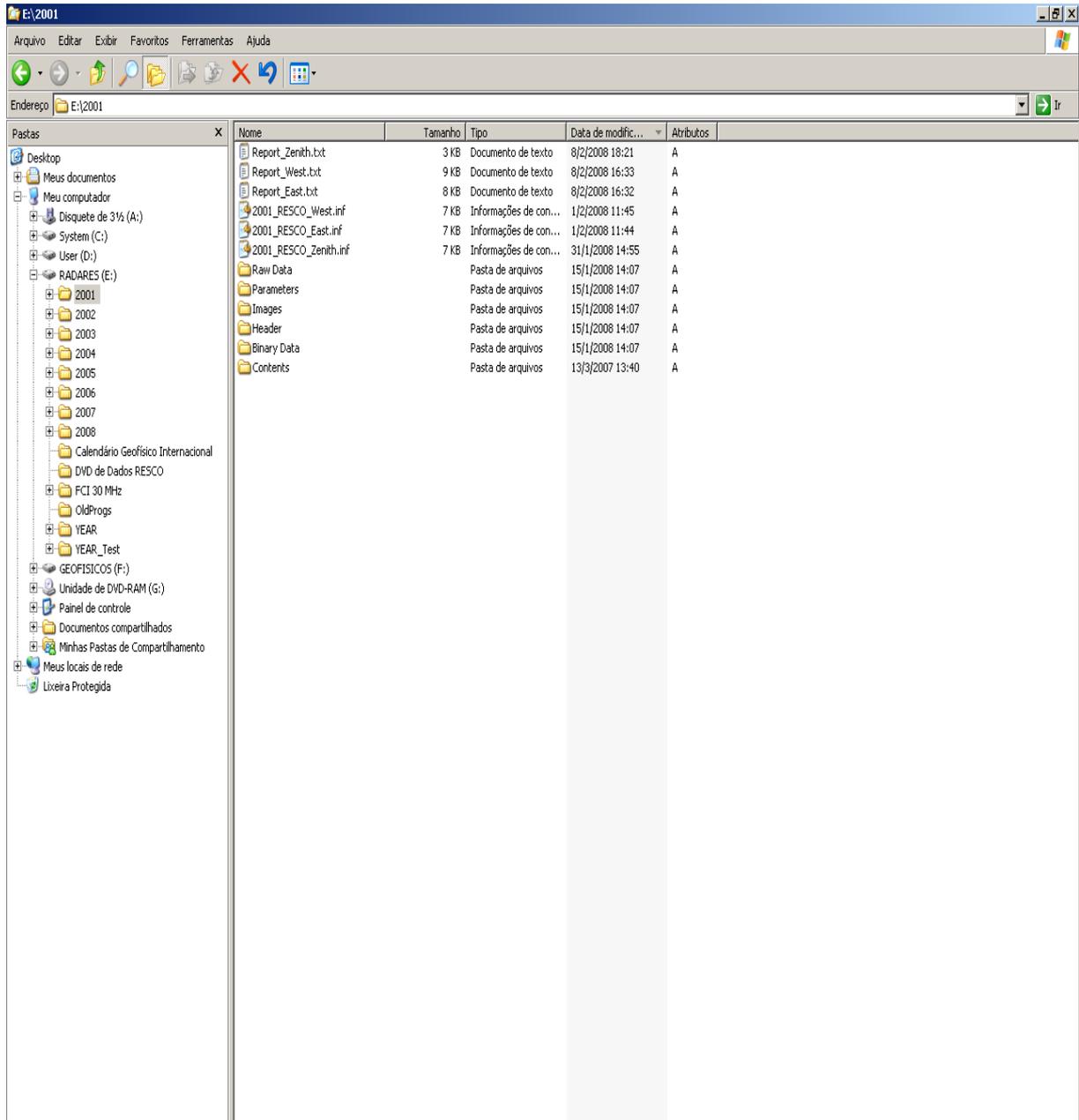


Figura 2.5- Exemplo da organização dos dados do radar.

3 - ANÁLISE DOS DADOS REDUZIDOS E PUBLICAÇÕES

Neste capítulo apresentaremos o estudo realizado com os dados reduzidos pela bolsista. Conforme mencionamos anteriormente, este trabalho é uma continuação do estudo anterior e teve como foco o estudo do comportamento da região E ionosférica durante e após um período de uma atividade magnética. Deste modo, vamos apresentar estudo das presenças de camadas ionosféricas esporádicas em períodos perturbados em São Luís - MA (2°31' S, 44°16' O) analisados a partir de dados de sondador digital e por assinaturas de correntes induzidas em dados de magnetômetros.

3.1-Resultados das Análises dos Dados de São Luís

Nos gráficos da figura 3.1 apresentamos os gráficos comparativos das frequências crítica, em MHz, da camada E para a região de São Luís - MA no decorrer dos dias em que ocorreu a tempestade de outubro de 2003. A curva marrom deste gráfico mostra a variação da frequência ordinária da camada E-esporádica (foEs) entre os dias 26 de outubro e 03 de novembro de 2003. A curva verde deste gráfico mostra a variação da frequência de bloqueio da camada E-esporádica (fbEs) para o mesmo período.

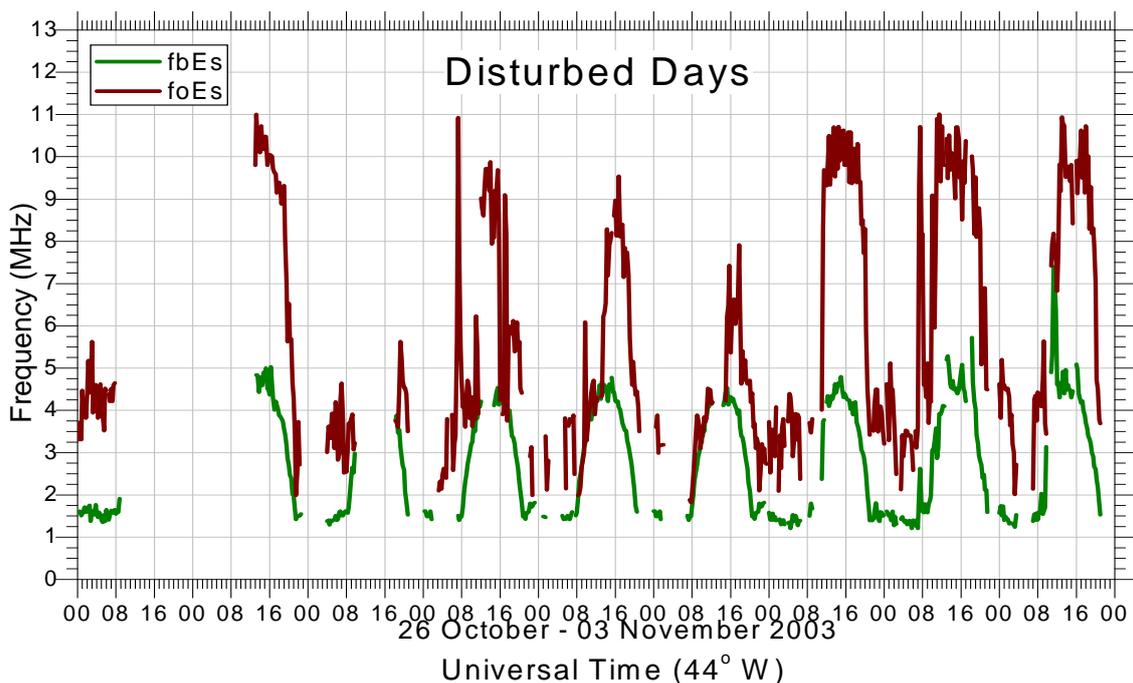


Figura 3.1- Variação da frequência crítica média em relação ao tempo para os períodos calmo e perturbado, nas estações do ano analisadas, obtidos a partir de dados de digissonda no sítio de São Luís- MA.

Para a confecção deste gráfico foram obtidos dados a cada 15 min pela digissonda instalada em São Luís - MA. Conforme nossas discussões nos capítulos anteriores, estes dados foram interpretados automaticamente pelo software *Artist* e reprocessados pela bolsista ionograma a ionograma. Ao final, os parâmetros de nosso interesse foram exportados para o formato ASCII para a produção destes gráficos apresentados acima.

3.2 - Discussões dos Resultados

Como foi mencionado na seção que trata da classificação dos dados do capítulo anterior, os dias durante os quais estes dados foram coletados, foram classificados como perturbados de acordo com o índice magnético DST.

Analisando a frequência crítica da camada E neste período, percebe-se que, para todos os dias nos horários da madrugada, este parâmetro se comporta variável de 4 a 6 MHz. No dia 26 de outubro, a análise foi prejudicada pela ausência de dados. No dia 27 de outubro, em torno das 13 h UT, o foEs apresenta um aumento para 11 MHz. Entre os dias 29-31 de outubro, foi visto a ocorrência de um comportamento singular que se caracterizou por máximos sucessivamente menores que se iniciaram na fase principal e terminaram no primeiro dia da na fase de recuperação da tempestade. No dia 29 de outubro a frequência crítica da camada E, em torno das 07 h UT, possuía valores de 11 MHz. Após este dia, nos horários ao entardecer, a frequência crítica sofreu um declínio sucessivo. O pico mais expressivo do dia 30 de outubro foi de 9,5 MHz e no dia posterior atingiu uma frequência de 08 MHz. Em seguida, o foEs retornando a frequência de 11 MHz. Este decréscimo sucessivo no valor máximo diário do foEs ainda é objeto de estudo e não possui uma explicação.

Com relação à frequência de bloqueio da camada esporádica (fbEs), durante toda a ocorrência da tempestade: fase inicial, fase principal e fase de recuperação; ela manteve seu comportamento típico tanto nos períodos calmos quanto nos períodos perturbados. No período calmo, o aumento do fbEs iniciou-se a partir das 10 h UT para todos os dias analisados. A densidade eletrônica aumentou consistentemente até alcançar a frequência equivalente à frequência de 4 MHz em torno do meio-dia local. Em seguida, a densidade eletrônica apresentou um decréscimo até alcançar o valor de fundo às 21 h UT, o qual corresponde à frequência em torno de 1,2 MHz. Contudo, um aumento súbito chama a atenção. No dia 12 de outubro em torno das 16 h UT, a frequência apresentou um aumento súbito elevando-se de 3,8 MHz para 5,2 MHz. A variabilidade diária do fbEs no período perturbado é bastante similar ao seu comportamento na condição magneticamente calma. Porém, no período perturbado a densidade eletrônica parece apresentar picos de aumento súbito que se sobrepõe ao comportamento descrito anteriormente. A presença de alguns destes picos parece ter contribuído para que a frequência de bloqueio tenha atingido um valor equivalente a 5 MHz em torno do meio-dia local. Mas alguns deles se destacam e sua amplitude parece ter aumentado à medida que a fase de recuperação evolui. No dia 01 de novembro, segundo dia da fase de recuperação da tempestade magnética, parece surgir um aumento evidente da frequência de bloqueio da camada Es, a julgar pelos picos que se observam em torno das 15 h UT deste dia. No dia seguinte (02 de novembro) observa-se um claro pico durante a madrugada (08 h UT) e vários picos ao longo do dia que deformaram o perfil e atingem aproximadamente 6 MHz por volta das 19 h UT. O evento mais significativo ocorreu no dia 03 de novembro onde se observa um expressivo aumento de 7,5 MHz por volta das 12 h UT.

Aumentos significativos da frequência de bloqueio da camada Es que ocorrem 2 e 3 dias após a tempestades magnéticas já foram observados em médias latitudes na região brasileira. Batista e Abdu (1977) publicaram um estudo de tempestades ocorridas em 1973 e 1975, no qual o fbEs obtido dos ionogramas da digissonda instalada em Cachoeira Paulista (CXP), 1 a 3 dias após a tempestade, atingiu valores superior à 7 MHz. Naquela época eles classificaram algumas camadas esporádicas como sendo do tipo “a” e após estudos de ventos e taxa de

recombinação eles verificaram que o aumento da densidade eletrônica deveria estar associado à precipitação de partículas do cinturão de Van Hallen e/ou da ionosfera superior.

No presente estudo, não foi realizada a classificação de todos os tipos de camada Es observados, tampouco foi realizado um estudo criterioso de ventos desta região. Contudo, o caso específico do evento do dia 03 de novembro foi examinado mais criteriosamente. Na figura 3.2 apresentamos uma seqüência de ionogramas obtidos em São Luís no dia 03 de novembro de 2003 entre 09 h e 13 h 15 min UT. O painel a esquerda mostra os ionogramas obtidos entre 09 e 11 h UT enquanto o painel a direita mostra os ionogramas obtidos entre 11 h 15 min e 13 h 15 min UT. Nesta figura é possível observar que a presença da camada esporádica do tipo q (E_sq), a qual é associada à formação do eletrojato equatorial, durou até às 09 h 30 min UT, quando se deu início a formação de uma camada do tipo c (E_sc), normalmente observada em médias latitudes. A partir das 10 h UT um fato interessante ocorreu. Há uma forte absorção da ionosférica que impediu a observação dos traços característicos das regiões E e F. Às 10 h 30 min UT a absorção parece diminuir revelando o que identificamos como uma camada E_sc , cuja assinatura típica pode ser observado às 11 h 45 min UT. As 12 h 15min UT a camada E_sc parece dar lugar à camada E_sq que parece dominar as alturas da região do ionograma a partir das 12 h 30 min UT.

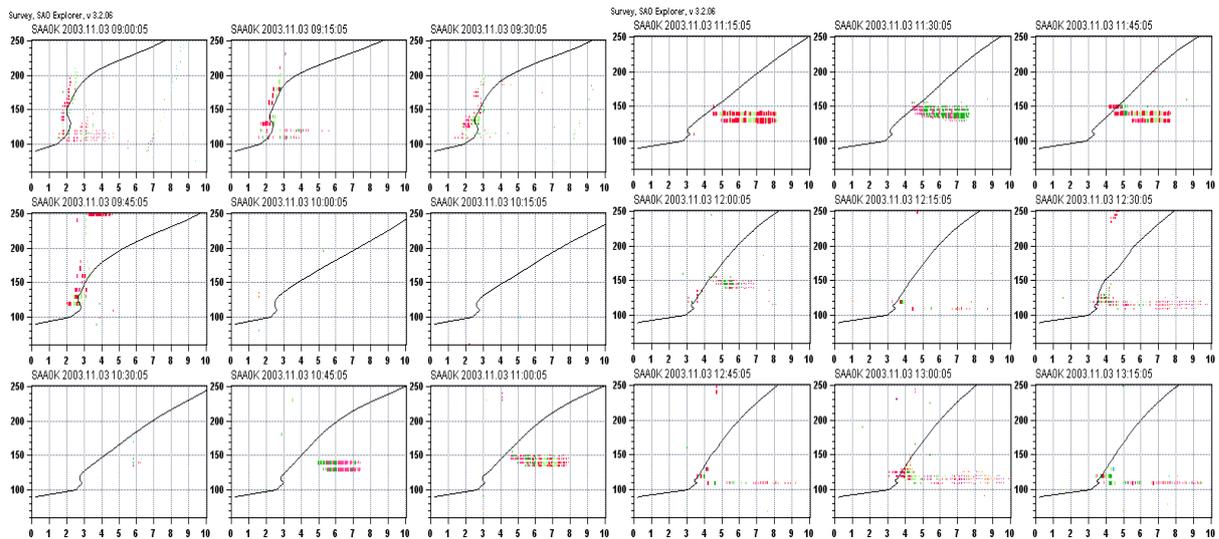


Figura 3.2 - Seqüência de ionogramas obtidos em São Luís - MA ($2^{\circ} 31' S$, $44^{\circ} 16' O$) no dia 03 de novembro de 2003 entre 09 h e 13 h 15 min UT. O painel a esquerda mostra os ionogramas obtidos entre 09 h e 11 h UT enquanto o painel a direita mostra os ionogramas entre 11 h 15 min e 13 h 15 min UT.

Para podermos comparar os horários em que estes eventos com os horários do aumento expressivo para 7,5 MHz que ocorreu no dia 03 de novembro a variação temporal no fbEs, nos dias 02 e 03 de novembro, foi plotada no gráfico da Figura 3.3, juntamente com a variação do efeito da corrente do eletrojato equatorial induzida no solo, medida em São Luís.

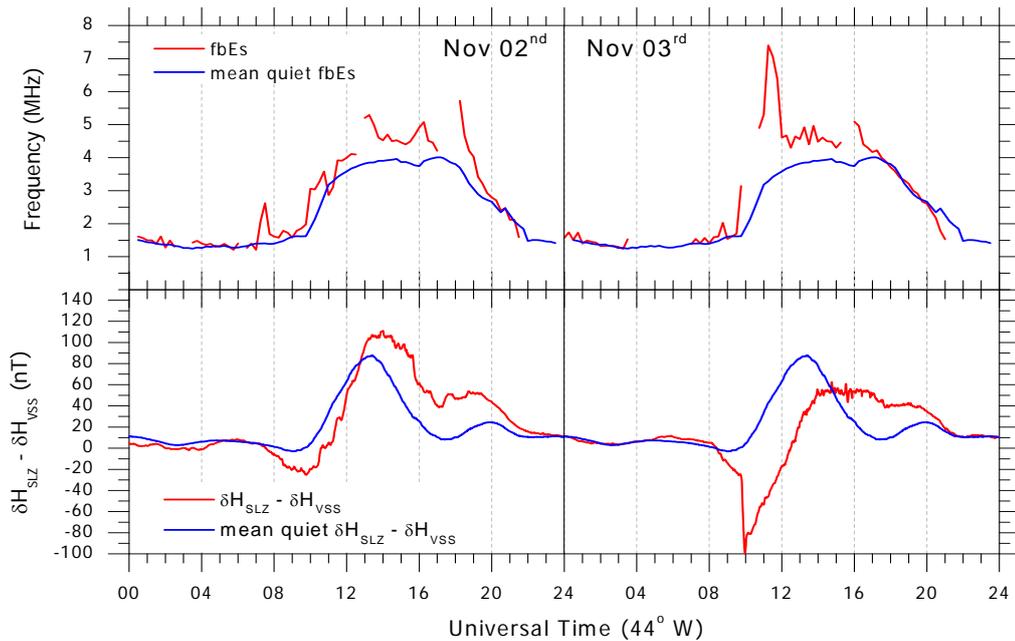


Figura 3.3 - Variação temporal do fbEs e do efeito da corrente do eletrojato equatorial induzida no solo nos dias 02 e 03 de novembro. A linha azul mostra a variação temporal média dos mesmos parâmetros acima para o período calmo de 10 a 12 de outubro.

A maneira pela qual o efeito da corrente do eletrojato equatorial induzida no solo é explicado no trabalho de Denardini et al. (2006) e, portanto, não será discutida neste manuscrito. Para os nossos propósitos, basta mencionar que incursões positivas representam a condição normal de eletrojato diurno, isto é, corrente do eletrojato fluindo para leste (campo elétrico positivo). Incurções negativas indicam que a corrente do eletrojato está fluindo para oeste (campo elétrico negativo). Com isso, fica evidente que o aumento súbito na densidade eletrônica do dia 03 de novembro ocorreu em condições de Contra-Eletrojato (CEJ). Além disso, a comparação do horário de ocorrência deste pico com os eventos descrito na Figura 3.2 indicam que a camada Es_c ter sido gerada devido aos efeitos da presença deste CEJ.

De fato, Devasia et al. (2006) publicaram um trabalho sobre a dependência do aparecimento de camadas esporádicas em latitude equatorial com o ciclo de atividade solar de 11 anos. Em seu trabalho eles mostraram vários eventos onde foi observado o aparecimento de camadas esporádicas que bloquearam parcial ou totalmente a reflexão dos raios-sinais nas camadas superiores. Todos os eventos mostrados ocorreram durante CEJ, porém todos eles em períodos magneticamente calmos. Em nosso exemplo, o aparecimento da camada Es_c se deu na fase de recuperação da tempestade quando índice Dst estava em torno de -30 nT.

A real causa do aparecimento desta camada esporádica, a qual provocou este aumento súbito na densidade eletrônica da região E, representada aqui pelo fbEs, ainda permanece em discussão. Mas, em virtude das características similares entre o nosso exemplo e as observações de Devasia et al. (2006) tendemos a crer que o seu aparecimento se deve às condições geradas pelo CEJ. Neste caso, é bastante provável que o campo elétrico induzido pelo cisalhamento de ventos, o qual se opõe ao campo elétrico leste-oeste natural do eletrojato, deve ter sido o responsável pela inversão no campo elétrico de polarização (visto na variação dos dados de magnetômetro). Este, por sua vez, foi o responsável pela geração irregularidade de plasma na porção superior da camada Es (gradiente de densidade negativo). Estas irregularidades são reconhecidas nos traços de sondadores digitais por sua associação

às observações de camadas esporádicas (Crochet et al., 1979). Isso explicaria, não só o porquê da ocorrência da camada E_s , mas também a sua altura de observação E_s , uma vez que a condição de campo elétrico e de gradiente de densidade eletrônica serem paralelos e com mesmo sentido é necessária para a geração das instabilidades. Análise similar pode ser realizada para o caso do pico que ocorre antes das 08 h UT do dia 02 de novembro. Porém, a situação fica mais complicada neste caso. O nível de perturbação magnética é maior que no caso discutido acima e o aumento súbito de densidade ocorre nos horário antes do amanhecer, enquanto a densidade eletrônica ainda esta bastante reduzida.

3.3 - Publicações dos Resultados Científicos

A partir dos resultados obtidos neste ano de bolsa, foram publicados trabalhos completos e resumidos em anais de eventos científicos nacionais e internacionais, nos quais a bolsista participou ativamente como apresentadora de forma oral, pôster e como co-autora de trabalhos de colegas de equipe. Nesta seção serão listados os trabalhos desenvolvidos pela bolsista, a partir dos dados e análises discutidas nas seções anteriores, no período que se refere este relatório.

3.3.1 - Participação em Congressos/ Submissão de Resumos

- **RESENDE, L. C. A., DENARDINI, C. M., AVEIRO, H. C., ALMEIDA, P. D. S. C.,** Olívio, Ê. P. A. Analysis of Sporadic-E Layers during Disturbed Periods Based on Ionosonde Data and Magnetometer Signatures of Induced Currents In: Union Radio-Scientifique Internationale, 2007, Rio de Janeiro. Annals of Eleventh URSI Commission F Open Symposium on Radio Wave Propagation and Remote Sensing. 2007.
- **RESENDE, L. C. A., DENARDINI, C. M., ALMEIDA, P. D. S. C., AVEIRO, H. C.** Estudo sobre as Presenças de Camadas Ionosféricas Esporádicas em Períodos Calmos e Perturbados em São Luís (MA): Um Caso Estudado. In: 10º Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica, 2007, Rio de Janeiro. Proceeding of the 10th International Congress of the Brazilian Geophysical Society. , 2007.
- **RESENDE, L. C. A., DENARDINI, C. M., ALMEIDA, P. D. S. C., AVEIRO, H. C.,** Olívio, Ê. P. A. Analysis of Sporadic-E Layers During Disturbed Periods Based on Ionosonde Data and Magnetometer Signatures of Induced Currents In: Escola Latino-Americana de Geomagnetismo, 2007, Resende. Livro de Resumos da ELAG. 2007.
- **RESENDE, L. C. A., ALMEIDA, P. D. S. C., AVEIRO, H. C., DENARDINI, C. M.** Estudo Comparativo Sobre as Presenças de Camadas Ionosféricas Esporádicas em Períodos Calmos e Perturbados nas Estações de São Luís (MA) E Cachoeira Paulista (SP) In: Seminário de Iniciação Científica do INPE, 2007, São José dos Campos. Livro de Resumos do Seminário de Iniciação Científica do INPE. 2007.
- **RESENDE, L. C. A., DENARDINI, C. M., ALMEIDA, P. D. S. C., AVEIRO, H. C.,** Olívio, Ê. P. A. Presenças de Camadas Ionosféricas Esporádicas em Períodos Perturbados em São Luís (MA) In: Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnologia em Engenharia, 2007, Passo Fundo. Anais do Congresso Regional de Iniciação Científica. , 2007.

Relatório Final de Atividades

- AVEIRO, H. C., ABDU, M. A., DENARDINI, C. M., **RESENDE, L. C. A.**, ALMEIDA, P. D. S. C. Analysis of Doppler Velocities of Equatorial Electrojet Type 1 Irregularities. In: Union Radio-Scientifique Internationale, 2007, Rio de Janeiro. Annals of Eleventh URSI Commission F Open Symposium on Radio Wave Propagation and Remote Sensing. 2007.
- DENARDINI, C. M., ABDU, M. A., AVEIRO, H. C., ALMEIDA, P. D. S. C., **RESENDE, L. C. A.**, Olívio, Ê. P. A., SOBRAL, J. H. A., WRASSE, C. M. Counter Electrojet Characteristics Obtained from Radar and Magnetometers: A Case Study in the Brazilian Sector In: Union Radio-Scientifique Internationale, 2007, Rio de Janeiro. Annals of Eleventh URSI Commission F Open Symposium on Radio Wave Propagation and Remote Sensing. 2007.
- ALMEIDA, P. D. S. C., DENARDINI, C. M., **RESENDE, L. C. A.**, AVEIRO, H. C. Estudo da Variação do Ângulo de Inclinação Magnética em São Luís (MA): Modelo IGRF vs Magnetômetro In: 10º Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica, 2007, Rio de Janeiro. Proceeding of the 10th International Congress of the Brazilian Geophysical Society. , 2007.
- DENARDINI, C. M., ABDU, M. A., SOBRAL, J. H. A., WRASSE, C. M., AVEIRO, H. C., Olívio, Ê. P. A., **RESENDE, L. C. A.**, ALMEIDA, P. D. S. C. The Lowering of the EEJ Back-Scattering Region Based on Coherent Radars Soundings in the Brazilian Sector In: 10º Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica, 2007 Proceeding of the 10th International Congress of the Brazilian Geophysical Society. 2007.
- AVEIRO, H. C., DENARDINI, C. M., ABDU, M. A., SCHUCH, N. J., **RESENDE, L. C. A.**, ALMEIDA, P. D. S. C. Variance Analysis of Incoherent Integration Applied to Simulated Equatorial Electrojet Irregularities Radar Power Spectra In: 10º Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica, 2007, Rio de Janeiro. Proceeding of the 10th International Congress of the Brazilian Geophysical Society. 2007.
- ALMEIDA, P. D. S. C., DENARDINI, C. M., **RESENDE, L. C. A.**, AVEIRO, H. C. Evolução do Mapa DIP Simulado Pelo Modelo IGRF Para a Localidade de São Luís (MA). in: Seminário de Iniciação Científica do INPE, 2007, São José dos Campos. Livro de Resumos do Seminário de Iniciação Científica do INPE. 2007.
- ALMEIDA, P. D. S. C., **RESENDE, L. C. A.**, DENARDINI, C. M., AVEIRO, H. C. Wavelet Analysis Applied to Magnetometer Data at a Magnetic Equatorial Site in: Escola Latino-Americana de Geomagnetismo, 2007, Resende. Livro de Resumos da ELAG. , 2007.

3.3.2 - Participação em Escolas Internacionais e Cursos

- Título: **VI Latin American School of Geomagnetism -ELAG**
 - Local: Hotel Santa Amália
Vassouras - RJ.
 - Período: 25-30 de Novembro de 2007
 - Ministrante: Dr. Andrew Jackson, Institut für Geophysik, ETH - Zurich;
Dr. Odim Mendes Jr., INPE - Brasil;
Dr. Jean Rasson, IRM - Belgique;
Dr. Minoru Funaki, National Institute of Polar Research - NIPR -

Relatório Final de Atividades

- Japan;
 - Dr. Kiyohumi Yumoto - SERC - Japan;
 - Dr. R.P. Kane - INPE - Brasil;
 - Dr. Valery Korepanov - Lviv Centre of Institute of Space Research - Ukraine.
- Carga horária: 50 horas

- **Título: International Heliophysical Year – IHY Latin American School**
 - Local: Hotel Braston
São Paulo- SP.
 - Período: 13-28 de Fevereiro de 2008
 - Ministrante: Dr. Maria Virginia Alves - INPE - Brasil
 - Dr. Inez S. Batista - INPE - Brasil;
 - Dr. Emília Correia - CRAAM/INPE -Brasil;
 - Dr. Sergio Dasso - IAFE –Argentina;
 - Dr. Paulo Fagundes - UNIVAP -Brasil;
 - Dr. Alberto Foppiano- DEGEO-UDEC -Chile;
 - Dr. Walter Gonzalez- INPE - Brasil;
 - Dr. Nat Gopalswany - NASA - USA;
 - Dr. Hugh Hudson - UC Berkeley - USA;
 - Dr. Pierre Kaufmann - CRAAM/MACKENZIE - Brasil;
 - Dr. Cristina Mandrini - IAFE - Argentina;
 - Dr. Carlos Nobre - INPE - Brasil;
 - Dr. Rainer Schwenn - Max-Planck - Germany
 - Dr. Yuri Stozhkov - LPI - Russia;
 - Dr. Bruce T. Tsurutani - NASA - USA;
 - Dr. Jose Valdés - UNAM - México;
 - Dr. David Webb - AFRL - USA
- Carga horária: 200 horas

- **Título: Curso de Wavelets**
 - Local: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
São José dos Campos - SP.
 - Período: 10 – 11 de Novembro de 2007/ 17-18 de Novembro de 2007
 - Ministrante: Eng. Henrique Aveiro Carlotto, mestrando em Geofísicas Espacial.
 - Carga horária: 40 horas

4 - CONCLUSÕES

A rotina desenvolvida foi à realização de trabalhos referentes ao assunto proposto, e ao processamento de dados. O método utilizado para o processamento de dados foi à redução dos dados da Digissonda. O estudo da digissonda é importante para a análise e o monitoramento da ionosfera. Uma vez que, através da análise dos dados pode-se verificar os parâmetros ionosféricos e as anomalias que ocorrem de acordo com a hora do dia. Também foram aprimorados os trabalhos referentes ao Radar Coerente RESCO utilizando o estudo de literatura específica.

A bolsista também aprimorou suas habilidades em análise de dados geofísicos e desenvolveu suas capacidades de escrever trabalhos científicos completos. Para atingir estes objetivos ela trabalhou com o software de interpretação de dados do sondador digital *SAO-Explorer* e processou dados reais de medidas de perfil de densidade eletrônica para as estações de coleta de dados geofísicos. Além disso, trabalhou com os dados de magnetômetros a fim de aprimorar seus conhecimentos sobre as ferramentas que serão úteis nos próximos trabalhos.

Ainda dentro do período de bolsa, a bolsista teve oportunidade de participar eventos de iniciação científica de cunho internacional como, por exemplo, a Escola Latino-Americana de Geomagnetismo (ELAG), IHY Latin American School, 10º Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica (SBGf), URSI Commission F Open Symposium on Radio Wave Propagation and Remote Sensing, onde interagiu com alguns dos principais pesquisadores da área. Ela participou de palestras e seminários, juntamente com pesquisadores, alunos de doutorado e mestrado, tecnólogos e pesquisadores visitantes. Além de participação como apresentadora em congressos já expostos acima.

Finalmente, as atividades teóricas e técnicas cumpriram o cronograma do projeto sendo: estudo da bibliografia referente ao trabalho a ser desenvolvido, treinamento, familiarização e desenvolvimento de aplicativos referentes à instrumentação utilizada no trabalho.

Portanto, e pelo exposto, consideramos este relatório aprovado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Batista, I.S.; Abdu, M. A., *Magnetic storm delayed sporadic E enhancements in the Brazilian geomagnetic anomaly*, **Journal of Geophysics Research**, 1977.
- Chapman, S. e Bartels, J. *Geomagnetism.*, **Clarendon Press**, v. 1, Oxford, 1940.
- Crochet, M., C. Hanuise, et al. *Hf Radar Studies of 2-Stream Instability During an Equatorial Counter-Electrojet*. **Journal of Geophysical Research-Space Physics**, v.84, n.NA9, p.5223-5233. 1979.
- Denardini, C. M., M. A. Abdu, et al. *VHF radar observations of the dip equatorial E-region during sunset in the Brazilian sector*. **Annales Geophysicae-Atmospheres Hydrospheres and Space Sciences**, v.24, n.9, JUL, p.1617-1623. 2006.
- Davies, K. *Ionospheric Radio Propagation*. Washington D. C.: **National Bureau of Standards**. 1965. 470 p.
- Devasia, C. V., V. Sreeja, et al. *Solar cycle dependent characteristics of the equatorial blanketing E-s layers and associated irregularities*. **Annales Geophysicae**, v.24, n.11, p.2931-2947. 2006.
- Findlay, J.W. *The phase and group paths of radio waves returned from region E of the ionosphere*, **J. Atmospheric and Terrest. Phys**, 1.353, 1951.
- Hargreaves, J. K. *The Solar-Terrestrial Environment*. Cambridge: **Cambridge University Press**, v.5. 1992. 420 p. (Cambridge Atmospheric and Space Science)
- Janardhanan, K. V. *A coherent VHF backscatter radar for INPE*. **São José dos Campos: INPE**, 1983. (INPE-2808-NTI/180).
- Kabata, Wanderlí. *Magnetômetro Fluxgate para Satélites Científicos*. **São José dos Campos, SP** – 2000.
- Moura, M.S.S.M.; *Estudos dos Sinais Propagados Via Camada E-esporádica em 44, 893 MHz*, **Tese de Doutorado, São José dos Campos**, 1994.
- Piggott, W.R., Beynon, W.J. G., G.M. Brown, and C. G.Little *The measurement of ionospheric absorption*, **Annals of the IGY**, Vol. III, Parte II., 1957
- Rishbeth H.; e Garriott, O.K, *Introduction to ionosphere physics*. **New York: Academic**, 1969.



Seddon, J.C., *Sporadic E as observed with rockets*, **Ionospheric Sporadic E**, p. 78, 1962.

Siqueira, J . *Desenvolvimento de Instrumentação para Medidas Geomagnéticas de Baixo Ruído Abordo de Satélites Científicos – Magnetômetro de Núcleo Saturado*, **Relatório Final PIBIC**, p.105, 2008.

Smith, E.K., *Worldwide occurrence of Sporadic E*, **NSB Circ.582**,1957.

Wright, J. W., Knecht, R. W., Davies, K., *Annals of the IGY*, Vol. III, Part I: **Pergamon Press.**, 1992.