

## ESTUDO DA ELETRODINÂMICA DO ELETROJATO EQUATORIAL

*Fabiola de Toledo Martins*

*Mangalathayl Ali Abdu*

Divisão de Aeronomia

Instituto de Pesquisas Espaciais - INPE

São José dos Campos - S P

E-mails: [fabiola@dae.inpe.br](mailto:fabiola@dae.inpe.br)

[abdu@dae.inpe.br](mailto:abdu@dae.inpe.br)

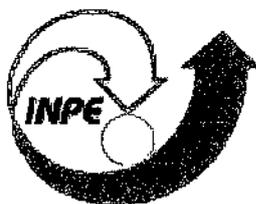
### RESUMO

De acordo com a variação em altura, a ionosfera está dividida em três regiões: região D, região E e região F, cada uma com suas propriedades e características.

Embora a região D seja uma importante parte da atmosfera terrestre a Digissonda não registra dados desta região. A região E situa-se entre aproximadamente 80 km e 180 km acima da superfície terrestre, é a região de máxima condutividade elétrica, devido à presença das correntes elétricas ionosféricas e sua interação com o campo magnético. A região F, que foi a mais utilizada neste trabalho, situa-se imediatamente superior a região E, em torno de ~180 km da superfície terrestre, estendendo-se até ~1000 km. Engloba as regiões superiores da ionosfera, possuindo as camadas refletoras mais importantes. Durante o dia a camada F pode dividir-se em duas camadas: F1 (encontrada nas regiões temperadas), F2 (normalmente encontrada em todo o globo terrestre) e a camada F3 (em estudo).

Neste trabalho foi realizado a redução dos dados para o período de 04 de março à 20 de abril de 1999, dados estes registrados pela Digissonda 256 instalada em São Luís (MA-BR). Todos os ionogramas em que o ARTIST não interpretava bem, foram feitas as correções da camada E, das camadas F1 e F2, e na redução da esporádica (região E) foram lidos os seguintes parâmetros: fbEs, foEs, h'Es e o type Es (q esporádica sempre frequente), os outros parâmetros: fminF, h'F, foF2, h'(fMUF) e peak F2 eram automaticamente calculados pelo programa de redução de dados chamado SAO-X.

O trabalho consiste no estudo da ionosfera para melhor entender os seus efeitos nas telecomunicações.



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

**Ciências Espaciais Atmosféricas  
Divisão de Aeronomia  
Ionosfera**

**Relatório Final de Bolsa de Iniciação Científica PIBIC/CNPq**

**Título do Projeto de Pesquisa:  
Estudo da Eletrodinâmica do Eletrojato e da Ionosfera Equatorial**

**Bolsista: Fabíola de Toledo Martins**  
INPE Ramal 6783 [fabiola@dae.inpe.br](mailto:fabiola@dae.inpe.br)

**Orientador: Mangalathayil Ali Abdu**  
INPE Ramal 6797 [abdu@dae.inpe.br](mailto:abdu@dae.inpe.br)

**São José dos Campos, Julho de 2001**

## Sumário

De acordo com a variação em altura, a ionosfera está dividida em três regiões: região D, região E e região F, cada uma com suas propriedades e características.

Embora a região D seja uma importante parte da atmosfera terrestre a Digissonda não registra dados desta região. A região E situa-se entre aproximadamente 80 km e 180 km acima da superfície terrestre, é a região de máxima condutividade elétrica, devido à presença das correntes elétricas ionosféricas e sua interação com o campo magnético. A região F, que foi a mais utilizada neste trabalho, situa-se imediatamente superior a região E, em torno de ~180 km da superfície terrestre, estendendo-se até ~1000 km. Engloba as regiões superiores da ionosfera, possuindo as camadas refletoras mais importantes. Durante o dia a camada F pode dividir-se em duas camadas: F1 (encontrada nas regiões temperadas), F2 (normalmente encontrada em todo o globo terrestre) e a camada F3 (em estudo).

Neste trabalho foi realizado a redução dos dados para o período de 04 de março à 20 de abril de 1999, dados estes registrados pela Digissonda 256 instalada em São Luís (MA-BR). Todos os ionogramas em que o ARTIST não interpretava bem, foram feitas as correções da camada E, das camadas F1 e F2, e na redução da esporádica (região E) foram lidos os seguintes parâmetros: fbEs, foEs, h'Es e o type Es (q esporádica sempre frequente), os outros parâmetros: fminF, h'F, foF2, h'(fMUF) e peak F2 eram automaticamente calculados pelo programa de redução de dados chamado SAO-X.

O trabalho consiste no estudo da ionosfera para melhor entender os seus efeitos nas telecomunicações.

## ÍNDICE

<b>1 - Introdução.....</b>	<b>1</b>
<b>2 - Ionosfera.....</b>	<b>4</b>
2.1 - <i>Porque se estuda a ionosfera.....</i>	<i>5</i>
2.2 - <i>Para que estudar e divulgar a ionosfera brasileira.....</i>	<i>6</i>
2.3 - <i>Regiões da Ionosfera.....</i>	<i>7</i>
2.3.1 - <i>Região D.....</i>	<i>8</i>
2.3.2 - <i>Região E.....</i>	<i>8</i>
2.3.3 - <i>Região F.....</i>	<i>9</i>
<i>Camada F1.....</i>	<i>9</i>
<i>Camada F2.....</i>	<i>9</i>
<i>Camada F3.....</i>	<i>9</i>
<b>3 - Ionogramas.....</b>	<b>10</b>
3.1 - <i>Redução.....</i>	<i>11</i>
3.2 - <i>Parâmetros das Regiões da ionosfera.....</i>	<i>12</i>
<b>4 - Sondas brasileiras.....</b>	<b>14</b>
4.1 - <i>Localizações das estações brasileiras.....</i>	<i>14</i>
4.2 - <i>Ionossonda.....</i>	<i>14</i>
4.3 - <i>Digissonda 256.....</i>	<i>15</i>
4.4 - <i>CADI ("Canadian Advanced Digital Ionosonde").....</i>	<i>16</i>
<b>5 - Metodologia.....</b>	<b>17</b>
<b>6 - Formulação do Problema.....</b>	<b>17</b>
<b>7 - Apresentação e análise de dados.....</b>	<b>18</b>
7.1 - <i>Dias, horários e estações.....</i>	<i>18</i>
7.2 - <i>Redução.....</i>	<i>18</i>
7.3 - <i>Programa.....</i>	<i>20</i>
<b>8 - Conclusões.....</b>	<b>22</b>
<b>Referências / Agradecimentos.....</b>	<b>23</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - <i>Mostra a localização da ionosfera em relação à atmosfera terrestre</i> .....	<b>4</b>
<b>Figura 2</b> - <i>Localização dos observatórios ionosférico em relação ao equador magnético</i> .....	<b>7</b>
<b>Figura 3</b> - <i>Regiões da Ionosfera</i> .....	<b>8</b>
<b>Figura 4</b> - <i>Ilustração das componentes ordinária e extraordinária</i> .....	<b>11</b>
<b>Figura 5</b> - <i>Ilustração de um ionograma registrado pela Ionossonda em Fortaleza (CE) para o dia 3 de fevereiro de 1979 às 15:59h (LT)</i> .....	<b>14</b>
<b>Figura 6</b> - <i>Ilustração de um ionograma registrado pela Digissonda DGS-256 em São Luís (MA) para o dia 05 de novembro de 1993 às 12:45h (LT)</i> .....	<b>15</b>
<b>Figura 7</b> - <i>Ilustração de um ionograma registrado pela Digissonda CADI em Fortaleza (CE) para o dia 15 de janeiro de 1995 às 15:10h (UT)</i> .....	<b>16</b>
<b>Figura 8a</b> - <i>Ionograma registrado pela DGS-256 em São Luís (MA) para o dia 06 de março de 1999 às 12:45h (UT) sem correção</i> .....	<b>19</b>
<b>Figura 8b</b> - <i>Mesmo ionograma corrigido</i> .....	<b>19</b>
<b>Figura 9a</b> - <i>Mostra a janela dos parâmetros utilizados para a redução da camada E-esporádica</i> .....	<b>19</b>
<b>Figura 9b</b> - <i>Visualização de todos os parâmetros que o programa SAO oferece</i> .....	<b>19</b>
<b>Figura 10a</b> - <i>Tabela dos parâmetros selecionados</i> .....	<b>20</b>
<b>Figura 10b</b> - <i>Gráfico dos parâmetros selecionados para o dia 04 de março de 1999</i> .....	<b>20</b>
<b>Figura 11</b> - <i>Janela de apresentação do programa</i> .....	<b>21</b>

## 1 - Introdução

Iniciei as atividades desta Bolsa de Iniciação Científica no dia 14 de novembro de 2000 em substituição à bolsista Luciana. O objetivo deste projeto de pesquisa foi a pesquisa da eletrodinâmica do eletrojato equatorial.

O termo “equatorial” aqui se refere ao equador magnético e não ao equador geográfico, não obstante essas duas linhas estarem relativamente próximas uma da outra. O equador magnético não coincide com o equador geográfico e sobre a região brasileira ele apresenta um grande desvio em relação ao equador geográfico. Na realidade a região brasileira é a região equatorial do globo terrestre onde o equador geomagnético mais se desvia da direção do equador geográfico, daí a importância de estudarmos a região equatorial magnética.

O eletrojato equatorial é uma corrente elétrica espacial que circula numa altitude de aproximadamente 110 km, ao longo do equador magnético (lugar geométrico dos pontos onde a inclinação do campo magnético terrestre é igual a zero). A largura dessa corrente elétrica é de aproximadamente 600 km e o sentido dessa corrente, ou seja, o sentido do deslocamento dos íons positivos que formam essa corrente elétrica, é de oeste para leste.

Essa corrente elétrica circula no espaço devido às características de condutividades elétrica altamente anisotrópicas da região E.

Da mesma forma que uma corrente elétrica circula ao longo de um fio elétrico, o eletrojato equatorial é uma corrente que flui ao longo de uma região da ionosfera eletricamente altamente condutora.

As minhas atividades neste projeto se concentraram no estudo da região E da ionosfera equatorial por dados de uma Digissonda 256 que é uma versão ultra moderna e sofisticada da antiga ionossonda. A Digissonda permite traçar o perfil de densidade eletrônica ionosférica, em tempo real, fato impraticável com um sistema de ionossonda comum.

A razão de estudarmos o eletrojato equatorial é que nessa região se forma o sistema de campos elétricos que regem a dinâmica (principalmente os movimentos verticais) do plasma ionosférico da região equatorial. A região equatorial magnética brasileira é muito longa e cobre vasta extensão sobre o território brasileiro.

Como o propósito desta Bolsa é dar-me uma iniciação científica, apresentei neste relatório uma descrição geral da ionosfera terrestre assim como os objetivos científicos de estudo da mesma junto com o método de sondagem aqui em apreço, para melhor me prover uma visão científica. A redução de dados experimentais ionosféricos coletados pelas digissondas (e ionossondas) constitui uma atividade importantes, e fundamental, deste projeto de iniciação científica.

A apresentação sinóptica sobre ionosfera aqui mostrada permitiu esta autora ter uma visão global da ionosfera terrestre, assim como uma visão introdutória da interação entre o plasma ionosférico e a termosfera (componente neutra da atmosfera terrestre que existe na mesma faixa de altura que a ionosfera).

A ionosfera vem sendo estudada desde o final da década de 20. Segundo o que já é conhecido, a ionosfera possui comportamento diversificado, conforme a região em que está localizada (latitude, altitude e longitude), a estação do ano e a atividade solar. Com o advento das telecomunicações via satélite, e por ser a ionosfera um meio condutor, fez-se necessário estudá-la mais profundamente, já que ela influencia diretamente a propagação desses sinais de comunicação.

A ionosfera terrestre, entre 150 km e 1000 km de altitude, é conhecida como Região F. A parte inferior da Região F estende-se de aproximadamente 150 km a 400 km [Rishbeth e Gariott, 1969], e durante o dia subdivide-se em duas camadas distintas conhecidas como F1 e F2. Contudo, ionogramas gravados nas vizinhanças de Fortaleza (4°S, 38°W; 7°S latitude magnética), mostram a evidência observacional de uma camada adicional ocorrendo, geralmente, na altura virtual de 650 km. Esta camada foi denominada camada F3 [Balan, 1997; Batista et al., 1999].

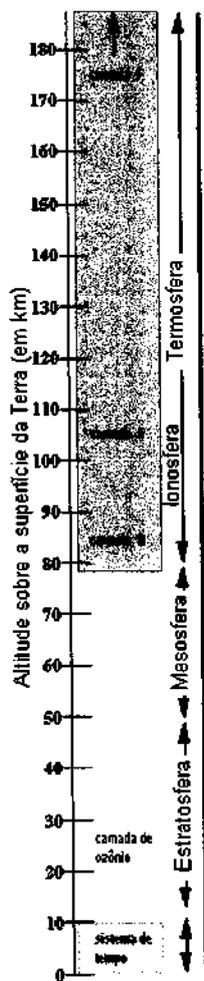
Os objetivos principais das atividades realizadas neste projeto são:

1. Aprender as técnicas das metodologias da redução de dados das digissondas através dos softwares dedicados para tal finalidade;
2. Aprender a interpretar os parâmetros do ionograma a fim de viabilizar a redução do mesmo com confiabilidade sob diversas condições ionosféricas;
3. Familiarizar com as características gerais da ionosfera da região equatorial e das baixas latitudes brasileiras durante as condições calmas e perturbadas da ionosfera.

O presente relatório se refere a uma fase inicial em qual as atividades foram dedicadas principalmente aos n<sup>os</sup> 1 e 2 dos itens acima mencionados.

O trabalho inicia-se com a localização da ionosfera, suas principais características, um breve histórico sobre a sua descoberta, a importância do seu estudo e a importância da divulgação da ionosfera brasileira. Em seguida o trabalho traz uma pequena descrição sobre as regiões da ionosfera apresentando os ionogramas registrados pela Digissonda 256.

## 2 - Ionosfera



**Figura 1**

A atmosfera terrestre é uma região rica em fenômenos naturais importantes diretamente para o homem e o meio ambiente. É dividida em regiões em função das suas características de temperatura: troposfera (do solo até ~ 10 km de altura), estratosfera (de 10 km a ~ 50 km de altura), mesosfera (de 50 km a ~ 80 km) e termosfera (acima de ~ 80 km). Essas faixas de altura variam dependendo da posição geográfica e hora local. Junto com a termosfera está a ionosfera como ilustrado na figura 1.

É formada em sua maior parte pela ação da radiação ultravioleta solar que arranca os elétrons das órbitas dos átomos neutros da atmosfera, gerando assim o par fotoelétron/ion positivo. O fotoelétron perde energia e, em subseqüente equilíbrio térmico, compõe com o íon livre o plasma ionosférico. Durante a noite, elétrons e íons se recombinam aos poucos tornando o plasma mais rarefeito. Sua parte mais densa fica localizada em torno de 300 km de altura. O íon mais abundante presente na ionosfera é o oxigênio atômico  $O^+$  (Sobral, 1995).

**Figura 1** - Mostra a localização da ionosfera em relação à atmosfera terrestre.

Sua importância está ligada às suas propriedades térmicas e elétricas. Com a sua alta condutividade elétrica, a ionosfera, num efeito combinado com o campo magnético terrestre, tem a propriedade de alterar consideravelmente a trajetória de ondas de rádio de alta frequência e frequências inferiores, refratando-as ou refletindo-as. Isto se deve ao fato da ionosfera formar um guia de onda com a superfície terrestre fazendo com que a onda de rádio se reflita sucessivamente caminhando distâncias transcontinentais. A ionosfera é um constituinte minoritário da atmosfera terrestre, ou seja, o seu peso é desprezível se comparado com ao peso da atmosfera não ionizada.

A existência desta camada condutora, ou ionizada, na atmosfera da Terra foi sugerida inicialmente pelas variações periódicas notadas nas medições do campo magnético terrestre.

Os primeiros estudos diretos da ionosfera foram realizados através de dados de reflexão de ondas de rádio, porém os trabalhos pioneiros, realizados na tentativa de provar a existência da camada condutora, foram feitos em clima de controvérsia. Trabalhos cientificamente orientados começaram nos anos 30 (*Kirchhoff, W. 1991*).

O conhecimento da ionosfera é útil em diversas aplicações, tais como: sistema de comunicação via satélite, sistema de localização geográfica e sistemas de navegação terrestre, aéreo e marítimo.

### **2.1 - Porque se estuda a ionosfera**

De forma sucinta pode-se dizer que se estuda a ionosfera pelas seguintes razões (*Sobral, 1990*):

1. Para melhor entender os seus fortes efeitos nas telecomunicações;
2. Para desenvolver aplicações tecnológicas. Os satélites artificiais podem ser parcialmente ou totalmente danificados pelo bombardeio dos elétrons relativísticos ou por campos elétricos de alta densidade. É possível que a danificação dos instrumentos de bordo dos satélites causada pela ação do meio interplanetário seja confundida com defeito de natureza técnica;
3. Para prevenir a poluição nuclear. Um satélite movido a combustível nuclear que se desintegre na atmosfera terrestre poderia deixar um rastro de partículas radioativas, que se precipitariam na região brasileira já que essa é a região do globo terrestre onde se precipitam as partículas energéticas do cinturão de radiação de Van Allen;
4. Para fins bélicos. O aquecimento artificial do plasma ionosférico feito por radares em solo ou “in loco” através de satélites poderia convenientemente confinar as radiocomunicações a uma região geográfica previamente estabelecida. Isto poderia provocar um blackout nas comunicações inimigas;
5. Para melhor se entender a climatologia espacial, cuja variabilidade nas vizinhanças da Terra, afeta de forma direta ou indireta a vida do dia a dia;
6. Para se estudar a física do plasma e em particular os fenômenos das instabilidades de plasma, permitindo a verificação das teorias;

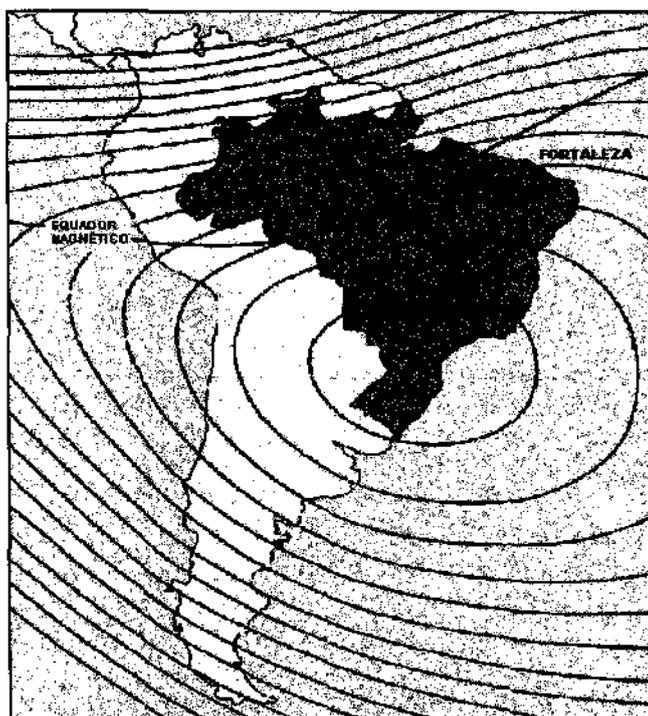
7. Para se estudar os processos quânticos que ocorrem em átomos e moléculas atmosféricas excitadas, permitindo a verificação das teorias; e
8. Para se estudar a espectroscopia óptica, permitindo a verificação das teorias.

## **2.2 - Para que estudar e divulgar a ionosfera brasileira**

A ionosfera sobre a região brasileira apresenta fenômenos únicos no globo terrestre de modo que o comportamento ionosférico siga regras peculiares.

O território brasileiro está praticamente todo confinado em baixas latitudes magnéticas, como o equador magnético cobrindo uma vasta extensão do país, estendendo-se do litoral do estado do Maranhão até o sul do estado de Rondônia (figura 2).

A ionosfera das regiões equatoriais e de latitudes baixas é freqüentemente perturbada por irregularidades de plasma que muitas vezes evoluem de tal forma a gerar grandes regiões de diminuição do plasma ionosférico conhecidas por bolhas de plasma. As bolhas de plasma interferem nas comunicações trans-ionosféricas, podendo afetar sinais de satélites até freqüências na ordem de gigahertz. Outro ponto peculiar a região brasileira é a existência da anomalia magnética do Atlântico Sul, a qual é caracterizada por um mínimo global na intensidade total do campo magnético terrestre. O centro dessa região de campo magnético mínimo esta localizado na costa sudoeste do Brasil. Devido a essa anomalia no campo magnético terrestre, as partículas energéticas dos cinturões de radiação que circundam a Terra (e que sofrem uma variação de deriva ao seu redor enquanto realizam o movimento de vai e vem ao longo de uma linha de campo magnético) atingem altitudes mais baixas na região brasileira, podendo sofrer colisões com a atmosfera mais densa, perdendo energia e se precipitando na ionosfera. Esse efeito constitui uma fonte adicional de ionização à ionosfera sobre a região brasileira e é importante tanto durante períodos calmos (Abdu e Batista, 1977; Souza, 1997), quando durante períodos calmos (Batista e Abdu, 1977).



**Figura 2** - Localização dos observatórios ionosférico em relação ao equador magnético.

O terceiro aspecto peculiar ao território brasileiro é a grande declinação do campo geomagnético, que atinge um máximo global no nordeste do Brasil, entre os trópicos de Câncer e Capricórnio. Isso faz com que as coordenadas magnéticas sejam bem distintas das coordenadas geográficas em nossa região. O vento termosférico, por ser provocado basicamente pelo aquecimento solar, pode ser descrito em função das coordenadas geográficas. Já a ionosfera, por ser um plasma, é melhor descrita em termos de coordenadas geomagnéticas. Como consequência, a interação termosfera-ionosfera-campo magnético apresenta comportamento bastante distinto daqueles observados em outras longitudes, onde a declinação é baixa. Portanto, os estudos e modelos desenvolvidos para outras longitudes não são válidos na região, tornando necessário o desenvolvimento de nossos próprios modelos tais como aqueles descritos por Batista (1985) e por Batista et al. (1995).

### 2.3 - Regiões da Ionosfera

De acordo com a sua variação em altura, a ionosfera está dividida em três regiões, cada uma com suas propriedades características. Essas regiões são denominadas de: região D, região E e região F, como ilustra a figura 3:

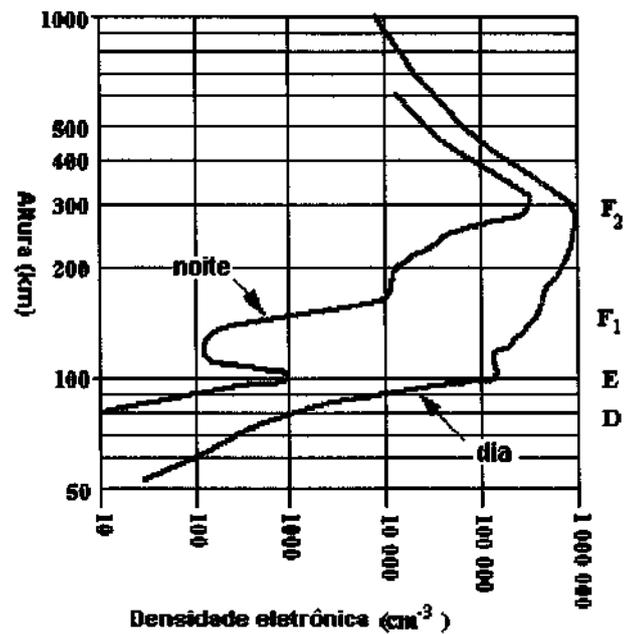


Figura 3 - Regiões da Ionosfera.

### 2.3.1 - Região D

Localizada na parte inferior da ionosfera, também denominada baixa ionosfera, a região D situa-se entre ~70 km e ~80 km de altura. É a menos densa de todas as regiões ionosféricas deixando de existir durante a noite. Essa região é responsável pela absorção das ondas de rádio em alta frequência que são refletidas nas camadas superiores. A densidade atmosférica é bastante significativa sendo que para qualquer estudo dessa região torna-se essencial levar em consideração as colisões entre íons, os elétrons e as partículas neutras.

### 2.3.2 - Região E

A região E situa-se entre aproximadamente 80 km e 180 km acima da superfície terrestre. Na maioria das vezes é mais frequente durante o dia. É a região de máxima condutividade elétrica. Sua importância é devido à presença das correntes elétricas ionosféricas e sua interação com o campo magnético.

### **2.3.3 - Região F**

A região F situa-se imediatamente superior a região E, em torno de ~180 km da superfície terrestre, estendendo-se até ~1000 km. Engloba as regiões superiores da ionosfera, possuindo as camadas refletoras mais importantes. Durante o dia a camada F pode dividir-se em duas camadas denominadas de camada F1 (encontrada nas regiões temperadas), camada F2 (normalmente encontrada em todo o globo terrestre) e a camada F3 (em estudo).

#### **Camada F1**

Tipicamente diurna a F1 é encontrada nas regiões temperadas. Localiza-se do limite inferior da região F até ~250 km de altura. É caracterizada por um pequeno pico secundário ou uma pequena inflexão na curva da concentração de elétrons em torno de 180 km.

#### **Camada F2**

Normalmente encontrada em todo globo terrestre, a camada F2 localiza-se a partir de ~250 km de altura e é nessa região que se concentram os íons e elétrons da ionosfera.

#### **Camada F3**

A camada F3 consiste em um pico de ionização formada em altas altitudes acima do pico da F2 e só é observada em baixas latitudes em torno do equador magnético. Esta camada forma-se durante a manhã, pouco antes do meio dia.

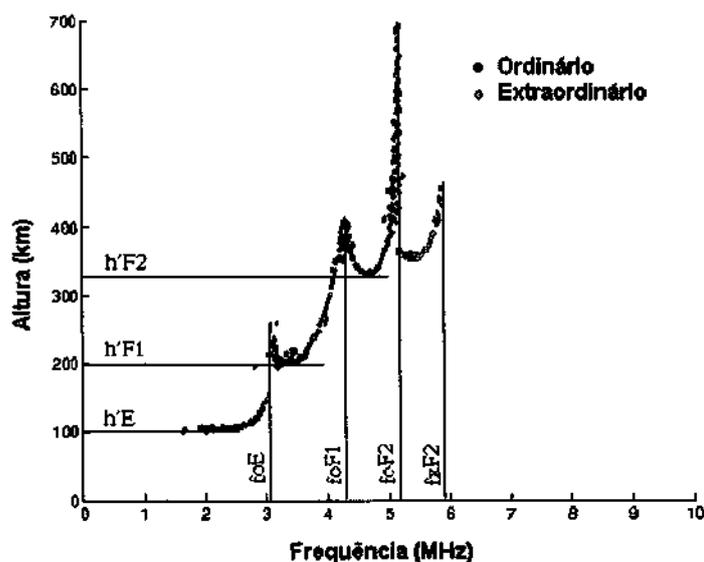
A literatura geral sobre ionosfera não inclui a camada F3, pois o estudo dessa camada só se intensificou a partir de 1977, após a publicação do trabalho de Balan et al.(1977) em que foram apresentados cálculos teóricos e os primeiros resultados observacionais da camada. Este trabalho de iniciação científica está inserido dentro das pesquisas que o grupo de ionosfera do INPE está realizando nesta área.

### 3 - Ionogramas

Os ionogramas são os registros fotográficos produzidos pelos equipamentos de sondagem, ou sondas, os quais mostram a variação da altura virtual de reflexão das ondas de rádio em função da frequência dessa onda. Essa altura é dita virtual devido ao fato da sonda medir o tempo decorrido entre a transmissão do pulso e a recepção do mesmo pulso após haver a reflexão na ionosfera e considerar esse tempo como proporcional a altura onde se deu a reflexão. A altura real onde a reflexão realmente aconteceu é sempre menor que a altura virtual. A ionosfera transmite pulsos de frequência variável, fazendo uma varredura de 1 a 20 Mz. A medida que a frequência da onda aumenta, a altura virtual mostrada no ionograma também aumenta. Quando a frequência alcança um valor limite, a onda incidente fura a camada, não havendo portanto, retorno do pulso incidente e a sonda mede a altura virtual como infinita.

Os ionogramas são normalmente fornecidos diariamente em intervalos regulares de tempo de 15 em 15 min para as Digissonda 256 e para a Ionossonda, e em intervalos regulares de tempo de 5 em 5 min para a Digissonda CADI, salvo quando ocorrem problemas técnicos com os equipamentos. Os ionogramas estão disponíveis em filmes de 35mm para a Ionossonda e em unidades de fitas magnéticas DC2120 para a Digissonda CADI e DC6150 para a Digissonda 256. No INPE de São José dos Campos, esses ionogramas são analisados, interpretados e medidos os parâmetros por técnicos do grupo de ionosfera.

É observado nos ionogramas que os ecos ionosféricos, dentro de certa faixa de frequência, separam-se em dois traços: componente ordinária ou traço O e componente extraordinária ou traço X. (Figura 4)



**Figura 4** - Ilustração das componentes ordinária e extraordinária.

A separação do sinal emitido em dois traços ocorre devido a presença do campo geomagnético (*Wakai et al., 1987*).

O traço O é refletido pela ionosfera após se propagar até uma altura em que a frequência da onda propagante se iguale a frequência de plasma.

### 3.1 - Redução

O termo redução é usado para definir a interpretação e a medição das frequências e das alturas virtuais das camadas de um ionograma. Assim reduzir um ionograma significa medir seus parâmetros de altura e frequência.

### **3.2 - Parâmetros das Regiões da ionosfera**

Um grande número de informações pode ser obtido de um ionograma, existindo algumas que são muito usadas em pesquisas científicas da Ionosfera, por isso são considerados padrões. Esses parâmetros são suficiente para se obter uma análise geral do ionograma.

Todos os parâmetros, são acompanhados das letras qualificativas e descritivas.

As letras qualificativas e descritivas são um conjunto de letras maiúsculas utilizado sempre que a leitura for feita com aproximações, ou que for impossível, ou ainda, quando se desejar registrar alguma ocorrência que envolva o parâmetro.

Colocando uma ou duas letras, conforme a necessidade, elas estarão informando maiores detalhes sobre a precisão da leitura do parâmetro. Assim a letra qualificativa vai indicar uma incerteza e a letra descritiva a causa da incerteza.

O uso dessas letras é de grande importância, pois ao analisar um gráfico obtido de um ionograma, caso seja observado algum comportamento fora do padrão, o usuário terá condições de saber as causas da alteração do comportamento.

Os parâmetros são regularmente lidos estão descritos na Tabela 1. Pode-se observar que não existe nenhuma referência específica para os para os parâmetros da camada F3, que vem sendo estudada recentemente.

Tabela 1 - Parâmetros da região da ionosfera.

Parâmetros	Descrição
<b>fminF</b>	<b>Corresponde a menor frequência na qual o traço do eco foi observado.</b>
foF1	Frequência crítica da onda ordinária da camada F1.
foEs	<b>Frequência crítica da onda ordinária correspondente a camada densa mais baixa da região E que causa descontinuidade na altura do traço E.</b>
<b>fbES</b>	<b>Menor frequência da onda ordinária, na qual a camada esporádica começa ser transparente.</b>
fxES	Máxima frequência da onda extraordinária, na qual o traço contínuo da camada esporádica foi observado.
<b>h'ES</b>	<b>Altura virtual mínima da camada esporádica observada.</b>
Type Es	<b>Corresponde ao(s) tipo(s) de esporádica observado.</b>
h'E	Altura virtual mínima da camada E.
foE2	Frequência crítica da onda ordinária da camada E2, que às vezes aparece entre a camada E normal e a camada F1.
h'E2	Altura virtual mínima da camada E2.
<b>h'F</b>	<b>Altura virtual mínima do traço ordinário em toda região F.</b>
h'F2	Altura virtual mínima do traço ordinário da camada F2.
<b>foF2</b>	<b>Frequência crítica da onda ordinária da camada mais alta da região F2.</b>
<b>h'(f MUF)</b>	<b>Fator de MUF para um percurso de 3000km, usando a camada F2.</b>
<b>Peak F2</b>	<b>Altura real do pico da camada F2.</b>

Os parâmetros em negrito foram reduzidos para este projeto de pesquisa.

## 4 - Sondas brasileiras

### 4.1 - Localizações das estações brasileiras

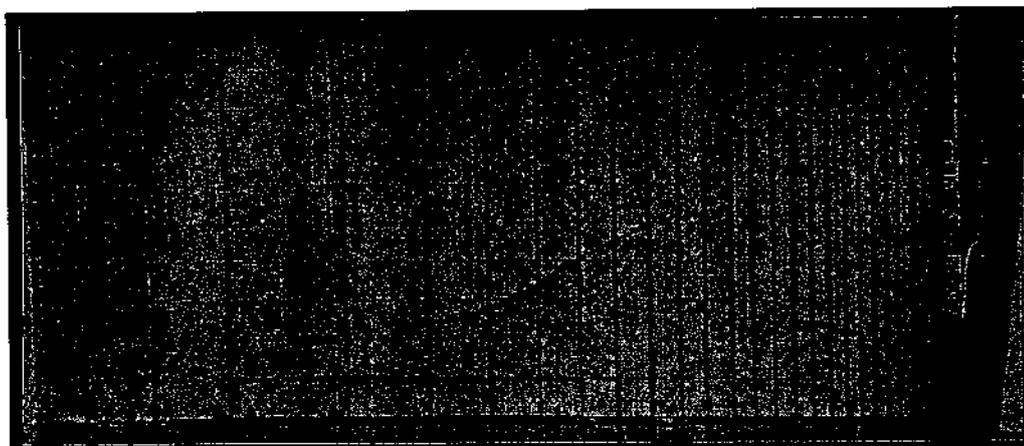
O INPE atualmente possui sondas nas seguintes cidades:

- São Luís (MA);
- Fortaleza (CE) e
- Cachoeira Paulista (SP).

### 4.2 - Ionossonda

É um dos instrumentos mais representativos para a medida de dados ionosféricos. Trata-se de um sistema transmissor-receptor que emite pulsos de energia eletromagnética em frequência variável na seqüência de 1 a 25 MHz. O sinal emitido na vertical, é refletido pela ionosfera e, em função do tempo decorrido entre a transmissão e recepção do pulso à frequência  $f$ , obtém-se as chamadas curvas de  $h'(f)$  ou ionogramas. A figura 5 mostra um ionograma registrado pela ionossonda tipo C4, que funcionou em Fortaleza entre 1975 e 1992.

A obtenção de ionogramas é de fundamental importância para o conhecimento da ionosfera, razão pela qual existem inúmeras estações de ionossondas pelo mundo. A figura 5 mostra um ionograma registrado pela ionossonda tipo C4, que funcionou em Fortaleza entre 1975 e 1992.



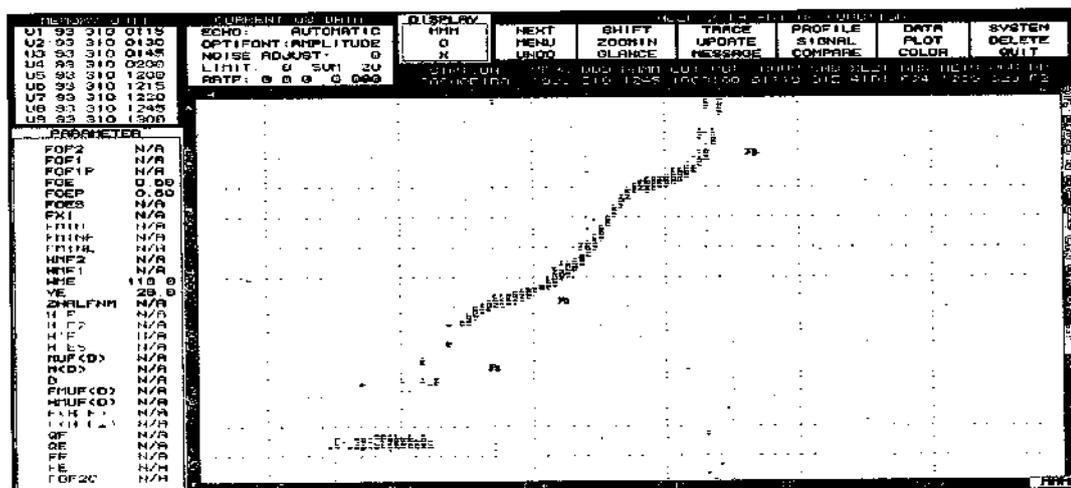
**Figura 5** - Ilustração de um ionograma registrado pela Ionossonda em Fortaleza (CE) para o dia 3 de fevereiro de 1979 às 15:59h (LT).

### 4.3 - Digissonda 256

A Digissonda 256 possui o mesmo princípio de funcionamento da Ionossonda, mas é um equipamento mais moderno e preciso.

Através de experimentos a bordo de satélites é possível efetuar sondagem do topo da ionosfera, vindo assim completar o trabalho das Digissondas, já que estas mostram o perfil até a altura do pico.

Para gerenciar os dados multiparamétricos, há o programa Adep (*Artist Data Editing and Printing*) o qual lê os dados de ionograma e dos parâmetros ionosféricos característicos reduzidos pelo Artist, a partir de fitas magnéticas, mostrando o ionograma digital com os traços reduzidos juntamente com as características em um monitor colorido com o propósito de analisar os dados ou alterar a redução. A figura 6 mostra um Ionograma registrado em São Luís, pela Digissonda DGS-256.



**Figura 6** – Ilustração de um ionograma registrado pela Digissonda DGS-256 em São Luís (MA) para o dia 05 de Novembro de 1993 às 12:45h (LT).

#### 4.4 - CADI (“Canadian Advanced Digital Ionosonde”)

A *CADI* é um equipamento portátil com baixo custo e de fácil instalação utilizada nas pesquisas científicas ionosféricas realizadas em campanhas de curta duração ou utilizada eficientemente em tempo contínuo como ocorre em Fortaleza(CE) instalada desde 1994.

Com a *CADI* é possível fazer o monitoramento da ionosfera local (opera fazendo sondagens em incidência vertical). Tais informações são de grande valia para as comunicações de rádio ponto a ponto e para as pesquisas científicas relacionadas com a ionosfera. A figura 7 mostra um ionograma registrado em Fortaleza pela *CADI*.

A Digissonda *CADI* foi instalada no Brasil em setembro de 1994 durante a campanha Guará cujos objetivos principais eram estudar o eletrojato equatorial e as bolhas ionosféricas.

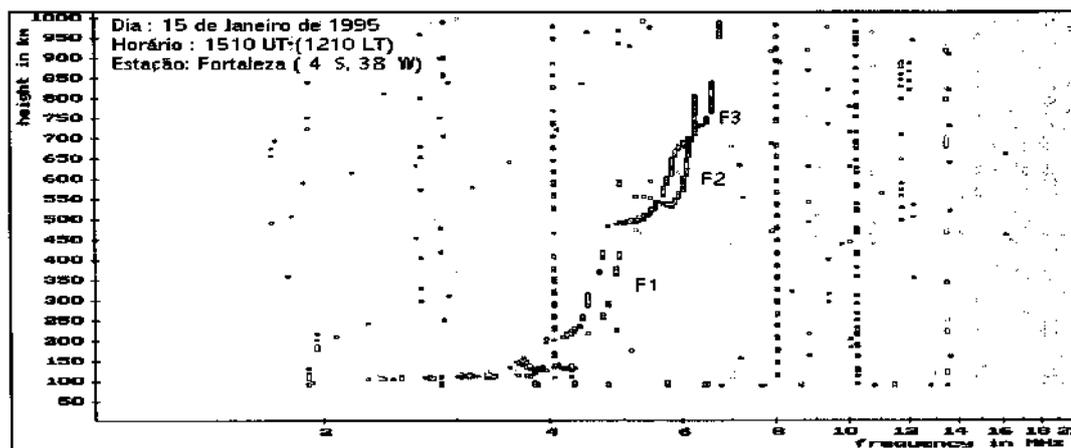


Figura 7 – Ilustração de um ionograma registrado pela Digissonda *CADI* em Fortaleza(CE) para o dia 15 de janeiro de 1995 às 15:10h (UT).

A Digissonda *Cadi* será utilizada e terá mais ênfase no próximo trabalho a ser efetuado na redução dos dados de Fortaleza.

## 5 - Metodologia

A ionosfera terrestre pode ser estudada experimentalmente de diversas formas tais como técnicas ópticas (fotômetros e imageadores), técnicas de rádio frequência (polarímetros, ionossondas, radares, GPS, riômetros etc.)

A presente metodologia abrange o uso de uma Digissonda na região de São Luís.

Portanto este trabalho teve como metodologia o seguinte:

1. tomar conhecimento de um modo geral das medidas ionosféricas feitas pela Divisão de Aeronomia do INPE.
2. Estudo de noções gerais da Digissonda 256
3. Estudo dos aplicativos que acompanham o sistema Digissonda 256
4. Testes Gerais dos aplicativos citados no item anterior.
5. Medida dos diversos parâmetros ionosféricos indicados em negrito na Tabela 1 deste relatório, por meio dos aplicativos citados no item 3.
6. Um breve e introdutória interpretação dos resultados obtidos.

## 6 - Formulação do Problema

A ionosfera é um plasma livre, ou seja, é um conjunto de partículas carregadas eletricamente positiva e negativamente criadas pela ação da luz solar na atmosfera neutra. A maior parte dos íons e elétrons livres são formados diretamente pela ação fotoelétrica (ou seja, átomo + fóton = elétron + íon) da luz solar. Uma vez formado, esse plasma interage com a termosfera (parte neutra da atmosfera, ou seja, sem cargas elétricas), e com o campo geomagnético, gerando dessa forma os fenômenos ionosféricos que conhecemos (eletrojato equatorial, camada E, camada E-esporádica E<sub>s</sub> etc.). No caso da ionosfera equatorial, a região E (veja a descrição geral das camadas ionosféricas apresentadas neste trabalho) abriga o eletrojato equatorial que profundamente altera as características morfológicas (distribuição espacial de elétrons e íons), através de fenômenos de instabilidades de plasma, marés e ventos. Este projeto de pesquisa visa medir e estudar em nível introdutório, por meio de medidas por digissondas, as características observadas da região E na presença do eletrojato.

## 7 - Apresentação e análise de dados

### 7.1 - Dias, horários e estações

Neste projeto de pesquisa foi feita a redução do dia 063 ao dia 090 do mês de março e do dia 091 ao dia 110 do mês de abril do ano de 1999.

O horário estipulado foi o dia todo (embora a redução tenha variado de 15 em 15 minutos e de 10 em 10 minutos nesta ordem).

A estação foi a de São Luís (03) como mostra a lista abaixo:

1 ) 0399063	13 ) 0399075	25 ) 0399087	37 ) 0399099
2 ) 0399064	14 ) 0399076	26 ) 0399088	38 ) 03990100
3 ) 0399065	15 ) 0399077	27 ) 0399089	39 ) 03990101
4 ) 0399066	16 ) 0399078	28 ) 0399090	40 ) 03990102
5 ) 0399067	17 ) 0399079	29 ) 0399091	41 ) 03990103
6 ) 0399068	18 ) 0399080	30 ) 0399092	42 ) 03990104
7 ) 0399069	19 ) 0399081	31 ) 0399093	43 ) 03990105
8 ) 0399070	20 ) 0399082	32 ) 0399094	44 ) 03990106
9 ) 0399071	21 ) 0399083	33 ) 0399095	45 ) 03990107
10 ) 0399072	22 ) 0399084	34 ) 0399096	46 ) 03990108
11 ) 0399073	23 ) 0399085	35 ) 0399097	47 ) 03990109
12 ) 0399074	24 ) 0399086	36 ) 0399098	48 ) 03990110

### 7.2 - Redução

Primeiramente foram lidos os dados das fitas magnéticas e posteriormente passados para CDs onde estão armazenados e organizados por dias.

Os dados foram reduzidos nesta seqüência:

1 - No programa chamava-se o dia desejado do CD e começava-se a reduzir o ionograma a partir das 00:00 horas. Foi feita a correção manualmente da camada F e nos horários apareciam F1 e F2 foram discriminadas;

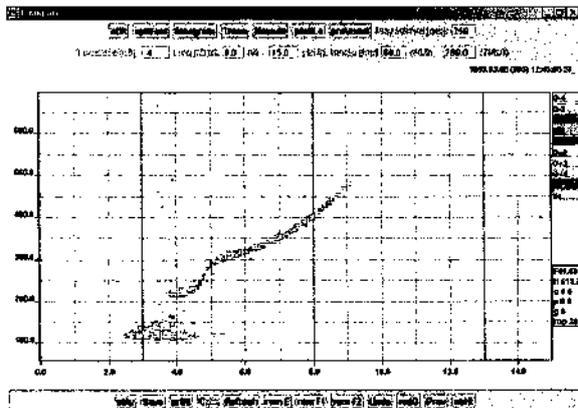


Figura 8a

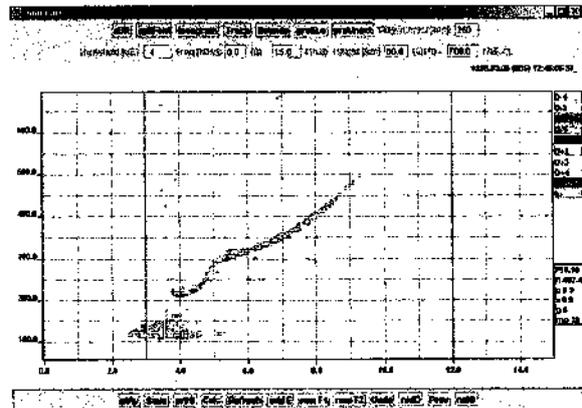


Figura 8b

Fig. 8a - Ionograma registrado pela DGS-256 em São Luís (MA) para o dia 06 de março de 1999 às 12:45h (UT) sem correção.

Fig. 8b - Mesmo ionograma corrigido.

2 - Em todos os ionogramas foram medidos em seqüência: fbEs, foEs, h'Es e o type Es (manualmente colocada), os outros parâmetros: fminF, h'F, foF2, h'(fMUF) e peak F2 eram automaticamente calculados;

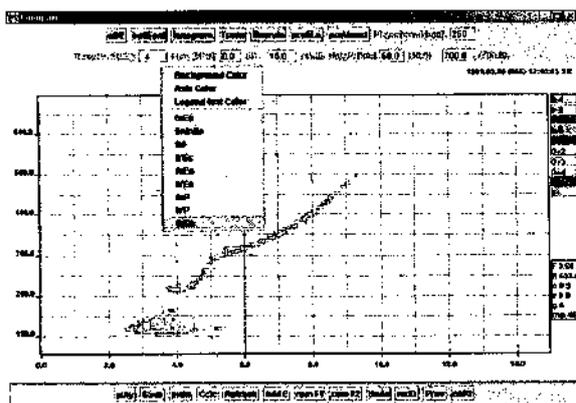


Figura 9a

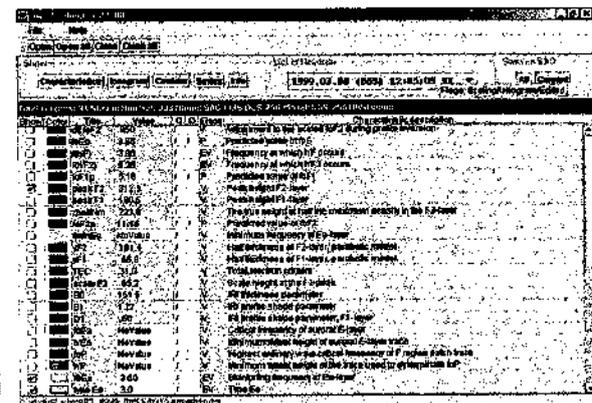


Figura 9b

Fig. 9a - Mostra a janela dos parâmetros utilizados para a redução da camada E-esporádica.

Fig. 9b - Visualização de todos os parâmetros que o SAO oferece.

3 - Após a redução chamava a função *Characteristics* (características) para verificar se esses parâmetros de todo o dia estavam corretos; essa conferência era efetuada através de uma tabela. Em seguida a função *Graphic* (gráfico); onde era mostrado um gráfico de um dia de redução;

Date (Day of year)	Time	F0F2	DUF	QDUF	h'p	h'p(2000)	Fmin	Fmax	Fmin	Fmax	type
1999-02-06 (066)	02:10:05	0.099	---	L-60	255.0	---	381.0	319.0	---	---	---
1999-02-06 (066)	02:12:05	0.400	---	L-110	253.0	---	370.8	287.0	---	---	---
1999-02-06 (066)	02:14:05	0.200	---	L-20	240.0	---	367.2	290.4	---	---	---
1999-02-06 (066)	02:16:05	0.580	---	L-60	240.0	---	367.2	290.5	---	---	---
1999-02-06 (066)	02:18:05	0.400	---	L-20	237.0	---	344.8	190.9	---	---	---
1999-02-06 (066)	02:20:05	0.600	---	L-10	231.0	---	355.0	175.6	---	---	---
1999-02-06 (066)	02:22:05	0.700	---	L-20	228.0	---	343.4	164.6	---	---	---
1999-02-06 (066)	02:24:05	0.700	---	L-60	220.0	---	329.7	136.3	---	---	---
1999-02-06 (066)	02:26:05	0.300	---	L-20	220.1	---	311.1	174.9	---	---	---
1999-02-06 (066)	02:28:05	0.200	---	L-60	230.0	---	323.0	276.7	---	---	---
1999-02-06 (066)	02:30:05	0.300	---	L-60	235.0	---	346.8	278.0	---	---	---
1999-02-06 (066)	02:32:05	0.099	---	L-60	236.0	---	339.0	285.0	---	---	---
1999-02-06 (066)	02:34:05	0.550	---	L-30	234.7	---	330.0	281.0	---	---	---
1999-02-06 (066)	02:36:05	0.650	---	L-30	233.0	---	321.0	279.1	---	---	---
1999-02-06 (066)	02:38:05	0.650	---	L-60	233.0	---	313.0	271.8	---	---	---
1999-02-06 (066)	02:40:05	0.699	---	L-60	244.0	---	346.0	319.0	---	---	---
1999-02-06 (066)	02:42:05	0.799	---	L-30	238.0	---	330.0	292.0	---	---	---
1999-02-06 (066)	02:44:05	0.100	---	L-20	220.4	---	311.0	307.0	---	---	---
1999-02-06 (066)	02:46:05	0.700	---	L-20	220.0	---	310.0	310.0	---	---	---
1999-02-06 (066)	02:48:05	0.200	---	L-60	240.0	---	341.0	324.4	---	---	---
1999-02-06 (066)	02:50:05	0.500	---	L-20	241.0	---	351.0	303.0	---	---	---
1999-02-06 (066)	02:52:05	0.775	---	L-40	245.0	---	356.0	308.0	---	---	---
1999-02-06 (066)	02:54:05	0.690	---	L-60	250.0	---	358.0	304.4	---	---	---
1999-02-06 (066)	02:56:05	0.350	---	L-40	248.0	---	346.0	311.5	---	---	---
1999-02-06 (066)	02:58:05	0.075	---	L-60	248.4	---	333.0	304.6	---	---	---
1999-02-06 (066)	03:00:05	0.550	---	L-30	243.0	---	346.0	301.0	---	---	---
1999-02-06 (066)	03:02:05	0.700	---	L-10	240.1	---	339.0	314.5	---	---	---
1999-02-06 (066)	03:04:05	0.400	---	L-10	231.0	---	332.0	291.4	---	---	---
1999-02-06 (066)	03:06:05	0.075	---	L-60	240.0	---	341.0	304.0	---	---	---

Figura 10a

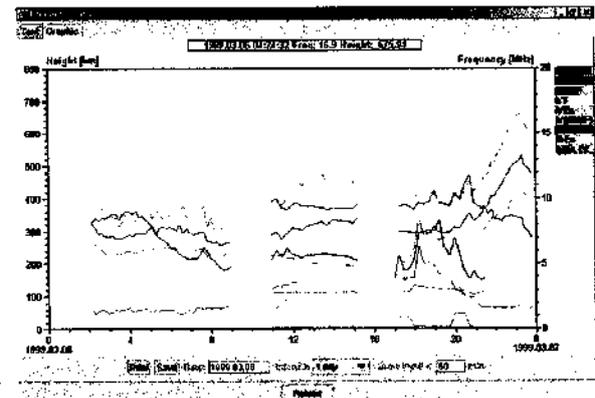


Figura 10b

Fig. 10a - Tabela dos parâmetros selecionados.

Fig. 10b - Gráfico dos parâmetros selecionados para o dia 04 de março de 1999.

4 - Depois de verificar o gráfico, salvava a tabela e finalmente imprimia o gráfico.

### 7.3 - Programa

Foi utilizado o programa de redução de dados chamado SAO-X.

SAO Explorador 2.5 pode ler ionogramas da Digissonda e formatos de dados de espalhamentos. Os dados de contribuição são providas duas escolhas, Abre e Abre Tudo:

- Selecionando Abre o deixará abrir um arquivo. O arquivo pode conter ionograma(s) de um dia.
- Selecionando Abre Tudo lhe permitirão abrir todos os arquivos arquivos no diretório atual de mesma extensão.

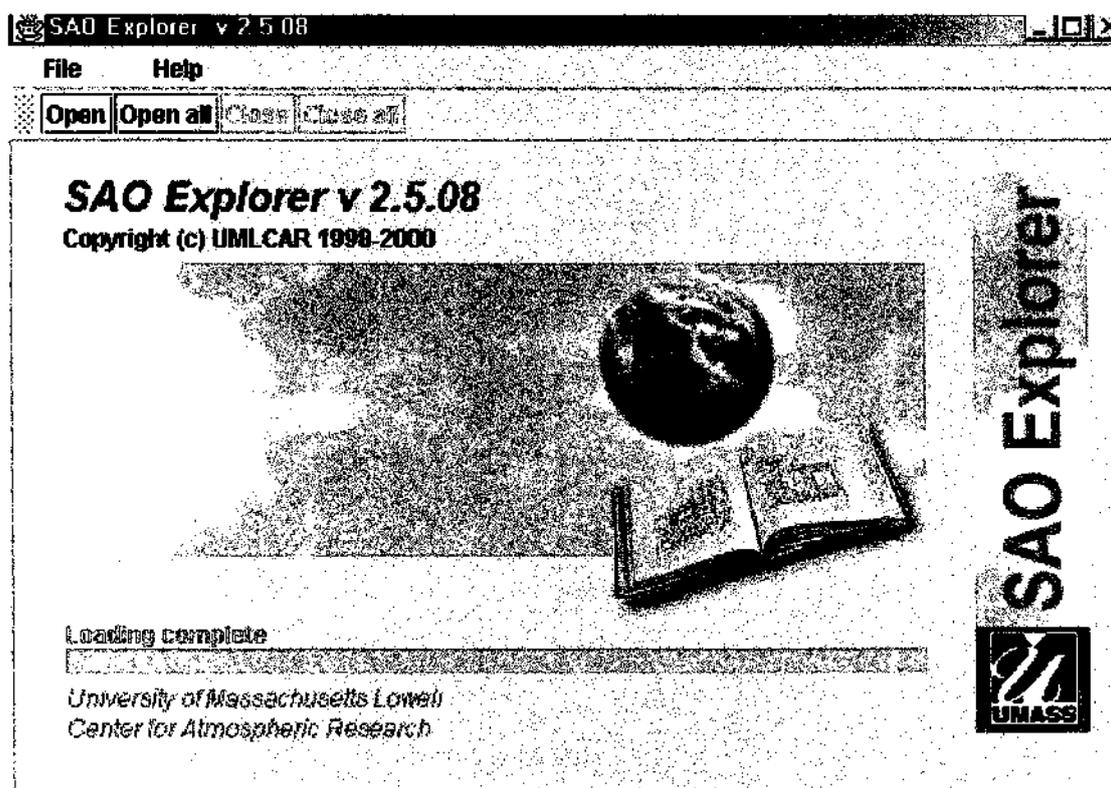


Figura 11 - Janela de apresentação do programa.

Pode-se usar Abre e Abre Tudo tantas vezes que precisar, uma vez que seu ionograma está aberto, poderá abrir também os dados de escalar que acompanham os ionogramas.

Na tela principal, existe a opção características, também providos de duas escolhas, texto e gráfico:

- Selecionando Texto mostrará em forma de tabela, os parâmetros e valores. com os dados registrados.
- Selecionando Gráfico exibirá o gráfico altura x frequência.

O programa é útil pois além de facilitar a redução, organiza os arquivos de dados em ordem de diretório, estação, ano, dia e hora específicos.

## 8 - Conclusões

Iniciei esta bolsa no dia 14 de novembro de 2000, substituindo a bolsista Luciana. Portanto este relatório se refere ao período de lá para cá, ou seja, aproximadamente 7 meses.

Nesses sete meses tive a ocasião de me familiarizar com a redução de dados da Digissonda 256, que é um instrumento de sondagem ionosférica de alto grau de sofisticação. Um versão portatil, e com mais atualizada tecnoogia da digissonda, ou seja, o DPS-4 (“Digital Portable Sounder” ) foi recém adquirida e se encontra operacional em Fortaleza. Trata-se de um equipamento caro, ou seja, de custo de cerca de US \$ 200 mil, e foi recentemente adquirido pelo recurso da FAPESP.

A Digissonda veio a substituir as antigas ionossondas.

A Digissonda tem a propriedade de traçar o perfil de altura real da densidade eletrônica. Já a ionossonda só mede o perfil em função da altura virtual.

O processamento de dados deste Projeto de Pesquisa foi feito principalmente por aplicativos (*softwares*) complexos, especialmente desenvolvidos pelos fabricantes da Digissonda.

Os parâmetros lidos estão mostrados em negrito na tabela da página 11.

As medidas de São Luís aqui concernentes permitiram de forma única medir também as características da região E da ionosfera equatorial. Nessa região passa o eletrojato equatorial que é uma corrente elétrica espacial que circula ao longo do equador geomagnético a uma altura de aproximadamente 110 km e tem uma largura de aproximadamente 600 km. O eletrojato equatorial circula de oeste para leste, ou seja, o sentido da corrente elétrica do eletrojato equatorial é de oeste para leste.

Devido aos intensos campos elétricos do eletrojato equatorial assim como as suas irregularidades de distribuição de plasma, a região E equatorial apresenta peculiaridades.

Dessa forma, através da redução de dados pude perceber que a camada E-espórádica tipo-q é predominantemente diurna, devido a presença do Eletrojato Equatorial.

O próximo trabalho a ser realizado, será baseado em dados registrados da digissonda tanto como os gravados pela DPS-4 e a CADI em Fortaleza, utilizando o sistema IONCADI e o SAO-X.

**Referências**

1. Balan, N.; Batista, I. S.; Abdu, M. A.; MacDougall, J.; Bailey, G. J. Physical Mechanism and Statistics of Occurrence of an Additional Layer at Equatorial Latitudes. *J. Geophys. Res.*, 103(A12):29169-29182, 1998.
2. Balan, N.; Batista, I. S.; Abdu, M. A.; Sobral, J. H. A.; MacDougall, J.; Bailey, G. J. Occurrence of an additional layer in the ionosphere over Fortaleza. *Adv. Space Res.*, in press, 1999.
3. Batista, I. S.; Balan, N.; Abdu, M. A.; Barbosa Neto, P. F.  $F_3$  Layer Observations at Low and Equatorial Latitudes in Brazil. *Geofísica Internacional*, in press, 1999.
4. Batista, I.S., Balan, N., Abdu, M. A., MacDougall, J., Barbosa Neto, P.F.,  $F_3$  layer observations at low and equatorial latitudes in Brazil, *Geofísica Internacional*, in press, 1999.
5. Barbosa Neto, P. F. *A camada ionosférica  $F_3$* , INPE, São José dos Campos, Agosto de 1999. Dissertação de Mestrado.
6. Bertoni, F.C.P. (mai/1997) - “Estudos de deriva ionosférica de São Luís (MA) e Cachoeira Paulista (SP) por meio de Digissonda digital” – dissertação de mestrado preliminar.
7. Borba, G. L. ( ) - “O sistema Digissonda 256 e suas potencialidades para os estudos ionosféricos” – publicação interna do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.
8. Jenkins, B.; Bailey, G. J.; Abdu, M. A.; Batista, I. S.; Balan, N. The formation of an additional layer in the topside equatorial ionosphere. *Adv. Space Res.* 20(6):1137-1140, 1997.

9. Kirchoff, V.W.J.H. (1991) - "Introdução a Geofísica Espacial" - São Paulo, Editora da Universidade de São Paulo.
10. Limiro, L.A.T. (1997) - "Sistema ionocadi – manual do usuário" – publicação interna do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE-6116-MAN/010.
11. Reinish, B.W.; Bibl, K.; Kitrosser, D.F.; Sales, G.S.; Tang, J.S.; Zhang, Z.; Bullett, T.W.; Ralls, J.A. (nov/1989) – "The digisonde 256 ionospheric sounder" – publicação em Wits Handbook #2.
12. Santana D.C. (1998) – "Trabalho de Instrumentação" Curso de Geofísica Espacial – Mestrado. Não publicado.
13. Sobral, J. H. A. (dez/1997) - "Experimentos ionosféricos e da alta atmosfera utilizando foguetes" - publicações em revistas especializadas.
14. Sobral, J. H. A., Por quê se estuda a ionosfera? *O Espacial* ISSN 0103-0795. Editado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Ano XVII, no. 78, Setembro de 1990.

### **Agradecimentos**

Este trabalho teve apoio financeiro do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica - PIBIC/CNPq e realizado na Divisão de Aeronomia (DAE) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE em São José dos Campos.

Aos Srs. Drs. Mangalathayil Ali Abdu e José Humberto Andrade Sobral, pela atenção dada a este trabalho.

À Sra. Maria Goreti dos Santos Aquino e a Sra. Lúcia de Almeida Terra pela colaboração na parte de redução de dados, pelos auxílios e amizade.

Aos colegas de trabalho Vivian, Alcione, Cristiane e Luís Flávio e a todos os amigos e pessoas que me ajudaram na realização deste.