

# Estudo da ionosfera tropical em 2002-2003 e condições geomagnéticas calma

*Flávio Honda Takeda<sup>1</sup>, Fábio Becker Guedes<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Bolsista do PIBIC, Universidade do Vale do Paraíba - UNIVAP, Avenida Shishima Hifumi, 2911, Urbanova, São José dos Campos, SP, 12244-000, e-mail: [flavinohonda@hotmail.com](mailto:flavinohonda@hotmail.com)

<sup>2</sup>Orientador, Universidade do Vale do Paraíba - UNIVAP, Avenida Shishima Hifumi, 2911, Urbanova, São José dos Campos, SP, 12244-000, e-mail: [fabio@univap.br](mailto:fabio@univap.br)

**Resumo-** Este artigo tem como objetivo estudar o comportamento ionosférico nos períodos de julho a outubro de 2002 e 2003. Utiliza-se uma ionossonda digital *Canadian Advanced Digital Ionosonde* (CADI) localizada em São José dos Campos – SP, que opera na faixa de *rádio-freqüência* (RF) de 1 MHz a 20 MHz. Em princípio, coletamos os dados no programa *Univap Digital Ionosonde Data Analysis* (UDIDA), onde são retirados os seguintes parâmetros: h'F, f0F2 e hpF2, todos decorrentes da camada F da ionosfera. A análise desses parâmetros é essencial para o melhor entendimento do comportamento ionosférico.

**Palavras-chave:** Ionossonda digital, rádio-freqüência, camada F, ionosfera

**Área do Conhecimento:** I - Ciências Exatas e da Terra

## Introdução

O que define a ionosfera é a presença de uma grande densidade de cargas livres formada por elétrons e íons. Os principais constituintes iônicos do plasma da ionosfera são o Oxigênio Atômico (O) e o Óxido Nítrico (NO).

A ionosfera terrestre é resultado da interação entre componentes atômicos e moleculares da nossa atmosfera com as fontes ionizantes solares e cósmicas [4]. Ela pode começar entre 50km a 70km e chegar até um pico de 2000km, lembrando que essa altura de 2000km é um limite arbitrário, pois a ionosfera não tem limite para terminar.

O plasma ionosférico é afetado pela radiação solar, onde os principais causadores de sua variabilidade diurna são os raios ultravioletas, raios-X e ventos solares [2]. Devido a isso, quando a atividade solar está normal, os parâmetros ionosféricos apresentam uma variação típica dos chamados períodos calmos. Por outro lado, como essa radiação é diretamente afetada pelas tempestades e sub-tempestades magnéticas nos períodos perturbados, os parâmetros ionosféricos podem sofrer grandes variações. Além disso, há variações mais lentas, como a do ciclo solar, que ocorre apenas de onze em onze anos.

Este trabalho tem como objetivo apresentar uma introdução ao estudo da ionosfera, além de mostrar uma análise do comportamento da camada F da ionosfera nos dias mais calmos dos meses de julho a outubro de 2002 e de 2003 em São José dos Campos.

A ionosfera apresenta várias anomalias e variações que dependem da hora do dia, das estações do ano, da latitude, do ciclo solar entre outros fatores que podem ser observadas na região de São José dos Campos através das

observações feitas pela ionossonda digital do grupo de Física Atmosférica da Univap, localizada no campus Urbanova.

## Camadas da Ionosfera

A combinação da variação vertical da atmosfera neutra com os diversos componentes químicos presentes nela resulta na existência de várias regiões, ou camadas ionizadas que serão descritas a seguir mostrados conforme a Figura1.

A camada D está localizada entre 70km a 90km da terra, onde ela é a principal responsável pela absorção das ondas de altas freqüências que são refletidas pelas camadas mais altas. Seu comportamento é diurno, aparece no momento em que as moléculas começam a adquirir energia solar e do ponto de vista químico ela é uma das camadas mais complexas. Os fatores principais são dois: esta região está sob alta pressão devido à coluna de ar e sofre ionização de várias fontes. As radiações ionizantes mais importantes são os raios-X (comprimento de onda  $\lambda$  menor que 10Å), que ionizam o Oxigênio e o Nitrogênio, ocorrendo em torno dos 80km. A radiação solar Lyman- $\alpha$  ioniza o Óxido Nítrico 1216Å e a ionização nas alturas inferiores são causadas por raios cósmicos.

A camada E está localizada entre 90km a 150km da terra. Para efeito de estudo das correntes elétricas, a camada E é uma das mais interessantes [5]. Em torno de 110km a condutividade ionosférica é máxima. Os ventos neutros que aí predominam transmitem movimentos às “camadas condutoras” por colisões que, na presença do campo geomagnético, originam as correntes. Em algumas ocasiões,

dependendo das condições de vento solar e energia absorvida durante o dia, a camada E pode permanecer esporadicamente à noite, quando isto ocorre é chamada de camada *E Esporádica*. Esta camada tem a particularidade de ficar mais ativa quanto mais perpendiculares são os raios solares que incidem sobre si. A camada F1 está localizada entre 150km a 200km da terra. Existe mais durante os horários diurnos, mas podendo aparecer esporadicamente à noite. A camada é de interesse porque é onde ocorre a transição entre as leis linear e quadrática para a perda eletrônica. A perda iônica ocorre em dois estágios: o primeiro passo é a transferência de cargas positivas de um átomo ionizado para uma molécula, e o segundo passo é dissociar a molécula carregada, recombinando-a com um elétron.

A camada F2 está localizada de 200km a 1000km. Ela engloba toda região superior e de pico. Acima disso, a ionosfera encontra-se em equilíbrio difusivo, isto é, o plasma se distribui com sua própria escala de altura. Seu aparecimento ocorre ao nascer do sol quando a camada F se desmembra em F1 e F2. A camada F2 é a que tem maior densidade de elétrons, com isso ela é responsável pela reflexão de ondas de alta frequência.

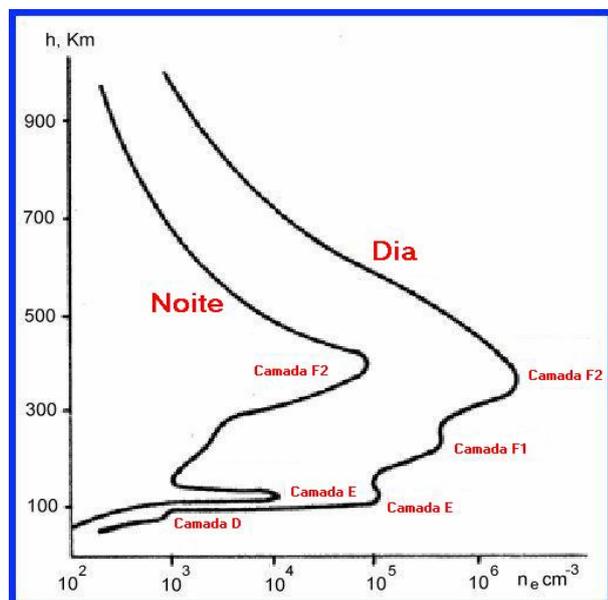


Figura 1 – Camadas da Ionosfera numa escala de altura (km) por densidade de eletrônica.

### Materiais e Métodos (Ionossonda Digital)

A ionossonda é um dos instrumentos mais representativos para a medida de parâmetros ionosféricos. Trata-se de um sistema transmissor-receptor que emite pulsos de energia eletromagnética de frequência variável, em seqüência, tipicamente de 1 MHz a 20 MHz. O

sinal, emitido normalmente na vertical, é refletido pela ionosfera e, em função do tempo decorrido entre a transmissão e recepção do pulso, obtêm-se as curvas da altura de reflexão da onda em função da frequência, os chamados ionogramas. Baseado na teoria de propagação de ondas na ionosfera, a teoria magneto-iônica, pode-se produzir, a partir dos ionogramas, curvas de densidade eletrônica em função de altura [5]. A obtenção de ionogramas é, portanto, de importância fundamental para o conhecimento da ionosfera, razão pela qual existem inúmeras estações de ionossondas pelo mundo [5].

Essa reflexão depende da frequência  $\omega$  que é transmitida pela ionossonda. O pulso eletromagnético vai se propagar verticalmente até encontrar uma região ionosférica com uma frequência de plasma característica  $\omega_{pe(h)}$  igual ou superior [3]. Quando  $\omega \leq \omega_{pe}$  ocorre à condição para a reflexão da onda eletromagnética [3]. Por essa razão, quando fazemos a varredura em frequência obtêm-se as reflexões do sinal em diferentes altitudes, correspondendo à variação da densidade eletrônica com a altitude, essa variação da densidade é proporcional ao aumento da frequência de plasma.

A reflexão de ondas eletromagnéticas pela ionosfera pode ser entendida facilmente usando-se a lei de Snell, muito usada na óptica. Um feixe de ondas emitido da superfície fazendo um ângulo  $\alpha_s$  com a normal, penetra no meio ionosférico de índice de refração  $\mu$  (proporcional da densidade eletrônica), fazendo um ângulo  $\alpha_i$  com a normal [6]. Lei de Snell :

$$\sin \alpha_s = \mu \sin \alpha_i$$

Se  $\alpha_i = 90^\circ$  o feixe de onda deixará de penetrar no meio ionizado, pois atingiu o ponto de reflexão, não havendo possibilidades de penetração acima dessa altura.

$$\mu = \sin \alpha_s$$

Sabendo que, o  $q$  é a carga, o  $\epsilon_0$  é a constante dielétrica,  $\omega$  é a frequência angular, o  $n(h)$  é a densidade em função da altura e o índice de refração é  $\mu$ , dado por:

$$\mu^2 = 1 - (q^2 / \epsilon_0 m \omega^2) n(h) \quad [6]$$

No caso de transmissão vertical, em que o feixe de ondas é transmitido verticalmente, o ângulo  $\alpha_s$  é reduzido a zero e a reflexão de onda se dará a uma altura em que  $\mu$  é zero, e como o plasma entra em ressonância a frequência  $\omega$ , esta é chamada de "frequência de plasma".

$$n(h) = (\epsilon_0 m / q^2) \omega^2$$

Quando  $\omega$  for muito grande não haverá reflexão e a onda atravessará a camada ionosférica.

No campus da Univap situada em São José dos Campos – SP, há uma ionossonda digital mais conhecida como *Canadian Advanced Digital Ionossonde (CADI)*. Essa ionossonda digital CADI consiste essencialmente de um radar que opera com *rádio-freqüências* (RF) de 1 MHz a 20 MHz emitindo pulsos de energia eletromagnética que cobrem desde 100km a 700km de altura virtual. Esse transmissor de *rádio-freqüência* (RF) está conectado a uma antena tipo delta, que transmite os pulsos de energia eletromagnética verticalmente para a ionosfera. Depois que os pulsos de energia são refletidos, outra antena tipo delta, que está ligada a um sistema de recepção de sinais, recebe os dados. Essa CADI é programada para receber ionogramas a cada cinco (5) minutos.

No sistema da Univap, os sinais são apresentados em computadores na forma de ionogramas, pelo programa *Univap Digital Ionossonde Data Analysis (UDIDA)* desenvolvido aqui mesmo na Univap. Os ionogramas gerados pelo CADI devem ser analisados para que possamos identificar os parâmetros ionosféricos.

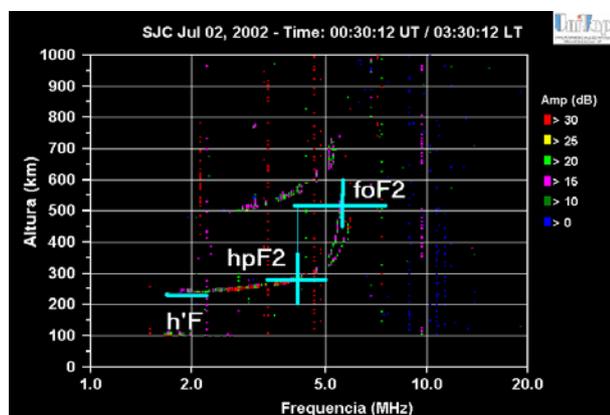


Figura 2 – Ionograma obtido em São José dos Campos no dia 02 de julho de 2002.

## Resultados

A ionossonda digital *Canadian Advanced Digital Ionossonde (CADI)* usada nesse processo está situada em São José dos Campos. Essa análise só é possível graças a um programa chamado *Univap Digital Ionossonde Data Analysis (UDIDA)* desenvolvido aqui mesmo na Univap. A Figura 2 mostra um ionograma (gráfico), onde podemos ver que o eixo vertical é a altura (h) medida em km, e o eixo horizontal a freqüência medida em Megahertz (MHz). Como podemos ver nessa Figura 2, três elementos básicos são

extraídos: h'F, hpF2 e foF2. O h'F é a altura mínima virtual da camada F, o foF2 é a máxima freqüência que ocorreu a reflexão e o hpF2 é muito próximo da altura real da base da camada F principalmente no período noturno. Esse parâmetro é encontrado através da equação empírica  $hpF2 = h(0.834 * foF2)$  [1]. Nas discussões o parâmetro hpF2 será considerado como a altura real da base da camada F.

Esses três parâmetros são essenciais para a pesquisa e análise da camada F e para monitoração do seu comportamento.

## Discussão

Na Figura 3 e 4 são apresentados os gráficos dos parâmetros ionosféricos hpF2, h'F e foF2 obtidos em São José dos Campos – SP. Os dados foram extraídos a cada 5 (cinco) minutos. Foram analisados os dias mais calmos de cada mês e extraídas médias para melhor visualização dos gráficos.

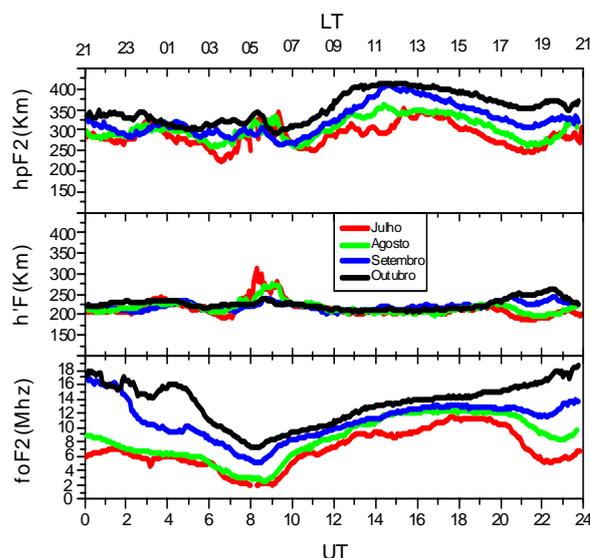


Figura 3 – Gráficos das médias do hpF2, h'F e foF2 dos dias calmos dos meses de julho, agosto, setembro e outubro de 2002. Foram analisados: 02, 03, 04, 14, 15 de julho; 05, 06, 07, 24, 25 de agosto; 20, 23, 24, 25, 28, 29 de setembro; 07, 08 11, 12, 13, 14, 15, 21, 22 de outubro.

O comportamento da ionosfera, durante dias calmos, possui menos flutuações, tais como as observadas nos gráficos apresentados na Figura 3 e 4. Para efeito de análise, define-se como período diurno a partir das 10h às 21h UT (7h às 18h LT) e como período noturno das 21h às 8h UT (18h às 5h LT). Enquanto que durante o dia a atmosfera sofre alta incidência de radiação solar, esse efeito não está presente à noite. Adicionalmente, entre 8h às 10h UT (5h às 7h LT) ocorre o chamado período de transição que é

caracterizado por altas taxas de recombinação pouco antes do aparecimento do sol.

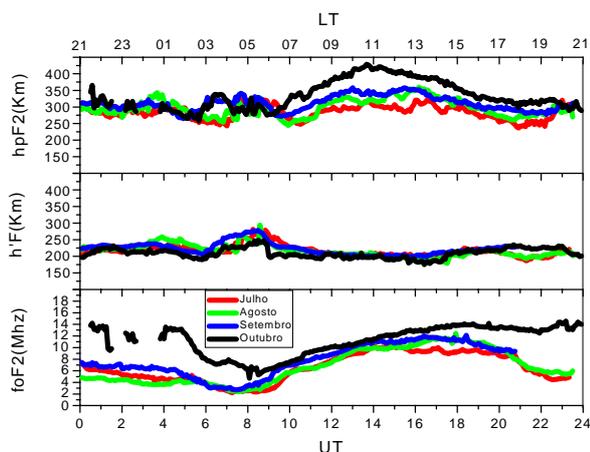


Figura 4 - Gráficos das médias do hpF2, h'F e f0F2 dos dias calmos dos meses de julho, agosto, setembro e outubro de 2003. Foram analisados: 08, 09, 10, 12, 21, 23 de julho; 04, 05, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 23, 27 de agosto; 01, 03, 07, 10, 15, 20, 21 de setembro; 02, 06, 11, 13, 17, 21, 23, 27 de outubro.

Na figura 3 e 4, o hpF2 se manteve em 250km a 300km de altura. Durante o período diurno a partir das 8h LT (11h UT) observa-se um pequeno aumento da altura da camada na média de todos os meses que atinge o máximo por volta das 12h LT (15h UT) aonde julho e agosto chegam a um pico 350km. Já os gráficos de setembro e outubro, sempre ficam acima do de julho e agosto, com um pico de 400km no mesmo horário.

Esse efeito é uma combinação da subida da camada devido à presença de campos elétricos e da subida aparente devido à maior ionização da parte mais alta da camada F e a recombinação mais efetiva na sua parte inferior - por ser uma região de mais alta densidade molecular. Observa-se que esse aumento durante o dia é mais evidente nos meses de setembro e outubro, nos dois anos analisados. Esse efeito está relacionado com as diferenças sazonais da atmosfera e deve ser estudada com mais profundidade em futuros trabalhos.

No período de transição percebe-se a ocorrência da subida aparente da camada através da observação do parâmetro h'F para os dois anos, chegando a um pico entre 250km a 300km. Esse fenômeno ocorre devido à recombinação molecular que está muito ativa na parte baixa da camada, diminuindo a densidade iônica nessa região.

Observa-se que a densidade da camada, que é proporcional ao parâmetro f0F2, começa a aumentar no início do dia por volta das 5h LT (8h UT). O valor médio mínimo parte de 2 Mhz e para de aumentar em 12 Mhz por volta das 17h LT (20h UT), pouco antes de anoitecer.

Este comportamento é esperado, pois no período diurno, a radiação solar está aumentando a densidade iônica da ionosfera, enquanto que no período noturno, quando a recombinação por colisões moleculares atua sozinha, acaba diminuindo essa densidade.

Os meses de setembro e outubro de 2002 e outubro de 2003 apresentam um comportamento um pouco diferente para f0F2. As figuras 3 e 4 mostram que a densidade eletrônica continua a aumentar após o pôr do sol, atingindo um máximo de 17MHz em 2002 e 15MHz em 2003. Esse comportamento diferenciado para a ionosfera deverá ser analisado com mais cuidado em trabalhos futuros, onde se utilize uma quantidade maior de dados, incluindo outros anos.

Como podemos reparar, na figura 4 são mostrados os parâmetros ionosféricos referentes ao ano 2003. Inicialmente podemos verificar falta de dados em hpF2 e f0F2, às 0:00h UT até 4:00h UT em outubro e às 21:00h UT até 0:00h UT no f0F2 de setembro, isto é devido a grande ocorrência de espalhamentos na camada F. Os períodos de setembro e outubro (primavera) são bem mais propícios a ter espalhamento do que julho e agosto (inverno), por causa das estações do ano e de outros fatores a mais.

## Conclusão

Neste artigo foram apresentados dados de comparação dos valores médios dos parâmetros ionosféricos dos meses de julho, agosto, setembro e outubro de 2002 e 2003, que possuem dias geomagneticamente calmos para a localidade de São José dos Campos. As comparações foram como esperado, entre julho a outubro de 2002 para 2003, não sofrendo grandes variações.

A nossa análise foi feita em um período chamado de "dias calmos", excluindo os períodos geomagneticamente perturbados pela atividade solar. Todavia com ocorrências de pequenas perturbações, provavelmente associadas a propagação de ondas de gravidade e ondas planetárias na região de estudo.

As fontes e importância dos fatores que causam tais variações serão estudadas em futuros trabalhos como:

- A presença de campos elétricos durante períodos calmos.
- Subida aparente da camada F, logo após o amanhecer, devido os processos de recombinação da parte superior da camada F.
- Diferenças sazonais dos parâmetros ionosféricos (h'F, foF2 e hpF2).

## Referências

- [1] PIGGOTT, W.R. and RAWER, K. URSI. **Handbook of ionogram interpretation and reduction**. World Data Center A for Solar Terrestrial Physics, November, 1972.
- [2] PIGGOTT, W.R. and RAWER, K. URSI. **Handbook of ionogram interpretation and reduction (revision of chapters 1-4)**, World Data Center A for Solar Terrestrial Physics, July 1978.
- [3] BASU, S. and DAS GUPTA. A. **Latitude variation of electron content in the equatorial region under magnetically quiet and active conditons**, J. Gephy. Res. V.73, 5599, 1968.
- [4] RISHBETH, H. and GARRIOT, O. **Introduction to ionospheric physics**, May 1969.
- [5] KIRCHHOFF, V. **Introdução à geofísica espacial**, Universidade de São Paulo. p. 121-124, 1991.
- [6] OMHOLT, A and EGELAN, A and HOLTER, O. **Cosmical Geophysics**, Universitetsforlaget, January 1973.