

## ESTUDO DOS PARÂMETROS IONOSFÉRICOS SOBRE A REGIÃO DE ANOMALIA EQUATORIAL PARA OS ANOS DE 2000, 2001 E 2005

*Karina Martinolli dos Santos*<sup>1</sup>, *Paulo Roberto Fagundes*<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Bolsista do CNPq, Universidade do Vale do Paraíba - UNIVAP, Avenida Shishima Hifumi, 2911, Urbanova, São José dos Campos, SP, 12244-000, e-mail: karina\_martinolli@yahoo.com.br

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

**Resumo** – Esta investigação tem a finalidade de estudar o comportamento dos parâmetros que caracterizam a região F da ionosfera: h'F (altura virtual mínima da camada F), hpF2 (altura do pico da camada F) e foF2 (frequência crítica), sobre a região da anomalia equatorial (São José dos Campos, 23°S), durante os períodos de atividade solar máxima (setembro de 2000 a agosto de 2001) e mínima (janeiro a dezembro de 2005). Para a obtenção dos dados ionosféricos, foi utilizada uma ionossonda digital, do tipo CADI, que basicamente é um sistema de radar, que opera na faixa de rádio frequência (1 - 20 MHz). Os dados que são apresentados na forma de "ionogramas" são visualizados, processados e analisados, pelo programa "UNIVAP Digital Ionosonde Data Analysis" (UDIDA). Posteriormente, foram feitos gráficos com os dados de todos os dias geomagneticamente calmos dos anos estudados e foram analisadas as mudanças sazonais em função do ciclo solar.

**Palavras-chave:** Ciclo Solar de 11 anos, Ionosfera, Camada F, Ionossonda Digital.

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

### Introdução

O ciclo de variação da atividade solar, habitualmente medido pela variação do número de manchas solares ou pelo parâmetro F10.7, dura cerca de 11 anos. Essas manchas solares são causadas pela rotação diferencial do sol. A rotação diferencial do sol se deve ao fato do sol girar mais rápido no equador que nos pólos, provocando intensos campos magnéticos.

Na atmosfera da Terra, entre os 50 km e os 600 km de altitude, existe uma região chamada ionosfera, que pode ser subdividida em 3 camadas: a camada **D** (aproximadamente de 50 km a 90 km), camada **E** (aproximadamente de 90 km e 150 km), e a camada **F** (aproximadamente entre 150 km e 1000 km). A camada F pode ser caracterizada pelos seguintes parâmetros: altura virtual mínima da camada F (h'F), frequência crítica (foF2) e a altura do pico da camada (hpF2). A altura das camadas varia principalmente com a hora, a estação do ano e atividade solar. Ionossondas digitais são instrumentos que têm sido bastante utilizados nos estudos sobre a ionosfera em vários observatórios ao redor do mundo. Os parâmetros ionosféricos podem ser obtidos através dos ionogramas.

A densidade dos elétrons aumenta da região D para a região F, onde pode atingir valores típicos de cerca de  $10^5$  a  $10^6$  e/cm<sup>3</sup>. A fotoionização da atmosfera é provocada pela radiação ultravioleta, extremo ultravioleta e RX proveniente do sol, atingindo um máximo de produção em torno do

meio-dia local. O processo de fotoionização acontece quando um fóton (UV, EUV e RX) possui energia suficiente ionizar um átomo ou molécula, e assim, é gerado o par elétron/íon. O elétron perde energia, e em subsequente equilíbrio térmico junto com o íon livre, compondo o plasma ionosférico (região F), que consiste da mistura de cargas negativas (elétrons) e cargas positivas (íons).

A ionosfera, por ser formada por partículas eletricamente carregadas, faz com que as ondas eletromagnéticas que se propagam no seu interior sejam refratadas, refletidas ou absorvidas. Pelo fato da região F ser a responsável pela reflexão de ondas eletromagnéticas de alta frequência, é considerada a mais importante para as comunicações de rádio-frequência, por esse motivo o grupo de pesquisa em Física Espacial da UNIVAP tem um interesse especial em seu estudo.

### Metodologia

Os dados utilizados nesse estudo foram coletados nos anos de 2000, 2001 e 2005 por uma ionossonda digital localizada na cidade de São José dos Campos (23°S). A ionossonda digital é um radar utilizado para estudos ionosféricos e seu funcionamento está relacionado com a uma propriedade de física de plasma. Uma onda eletromagnética só se propaga no meio ionizado quando sua frequência é maior que a frequência de plasma. Portanto, o pulso eletromagnético partido da ionossonda, vai se propagar no meio

ionizado até encontrar uma região da ionosfera com uma frequência de plasma maior ou igual a sua. Quando isso ocorrer há a reflexão total desse pulso eletromagnético.

Uma onda eletromagnética ordinária se propaga na região ionizada da atmosfera de acordo com a relação de dispersão:

$$k^2 c^2 = \omega^2 - \omega_{pe}^2 \quad (1)$$

onde

$$\omega_{pe}(h) = \left[ \frac{n_e(h) e^2}{m_e \epsilon_0} \right]^{1/2} \quad (2)$$

$k$  é número de onda ordinária,  $\omega$  é a frequência da onda ordinária,  $\omega_{pe}(h) = 2\pi f_e$  representa a frequência natural do plasma ionosférico,  $c$  é a velocidade da luz no vácuo,  $n_e$  é a densidade numérica de elétrons,  $e$  é a carga do elétron,  $m_e$  é a massa do elétron e  $\epsilon_0$  é a permissividade elétrica do vácuo.

Assim, realizada uma varredura na faixa de radio frequência de 1MHz a 20MHz e com o conhecimento do intervalo de tempo de espera para a reflexão desses, é possível recolher informações referentes ao perfil vertical da densidade eletrônica da ionosfera e a altitude entre a superfície onde se encontra a ionosonda e a região de reflexão.

Os dados coletados pela ionosonda são processados pelo programa "UNIVAP Digital Ionosonde Data Analysis" (UDIDA). Em seguida, são visualizados em forma de gráficos, chamados ionogramas.

Ionogramas são espectros que mostram a altura onde ocorreu a reflexão dos pulsos de ondas eletromagnéticas transmitidos pela ionosonda, em função da frequência.

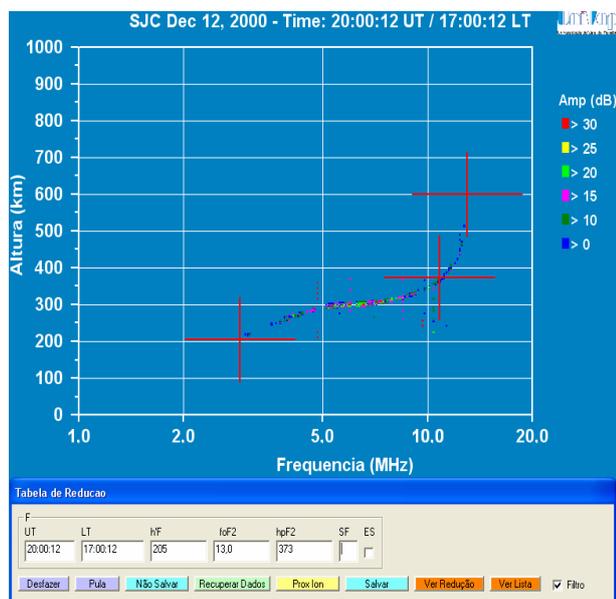


Figura 1 - Ionograma obtido em São José dos Campos (SP) em 12 de dezembro de 2000, 20:00 UT.

A figura 1 mostra um ionograma característico, que consiste em um gráfico de frequência (MHz) em função da altura (km), no traço mostrado o apresenta-se às reflexões que ocorrerão na camada F da ionosfera. Nesta figura são extraídos três parâmetros ionosféricos importantes: h'F (altura mínima virtual da camada F), foF2 (máxima frequência em que ocorreu a reflexão) e hpF2 ( $hpF2 = h(0.834 \times foF2)$ ).

Foi utilizado o índice Dst (Disturbance Storm Time) que monitora o nível de atividade geomagnética – que é obtido através da componente horizontal (média) do campo magnético de estações em médias e baixas latitudes – para identificar os dias geomagneticamente calmos e os perturbados. Nessa investigação foram considerados dias geomagneticamente calmos, aqueles com valores menores que -100nT.

## Resultados

As figuras abaixo mostram a variação dos parâmetros ionosféricos para dias calmos durante período de atividade solar máxima e mínima.

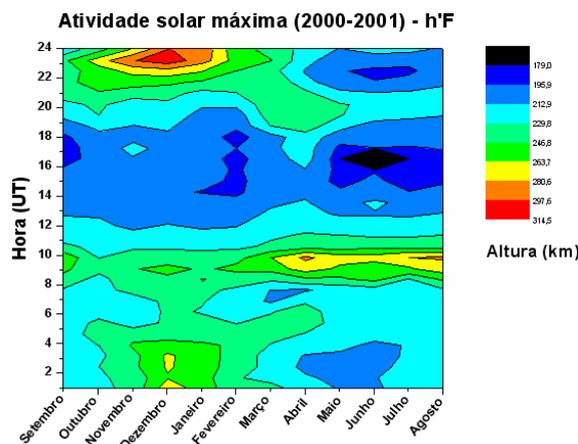


Figura 2 - Variação diurna do parâmetro h'F para os meses de setembro de 2000 a agosto de 2001 para atividade solar máxima.

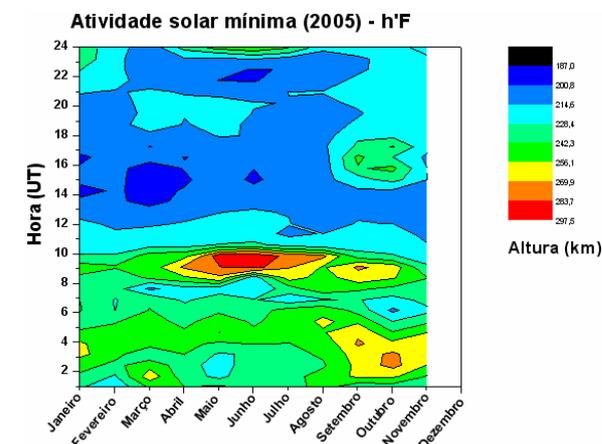


Figura 3 - Variação do parâmetro h'F para os meses de janeiro a novembro de 2005 para atividade solar mínima.

As Figuras 2 e 3 mostram a variação diurna do parâmetro altura mínima virtual da camada F (h'F), em função da hora (UT) e dos meses do ano.

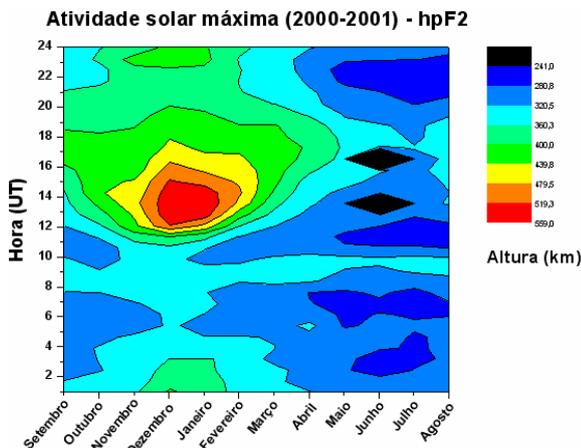


Figura 4 - Variação diurna do parâmetro hpF2 para os meses de setembro de 2000 a agosto de 2001, para atividade solar máxima.

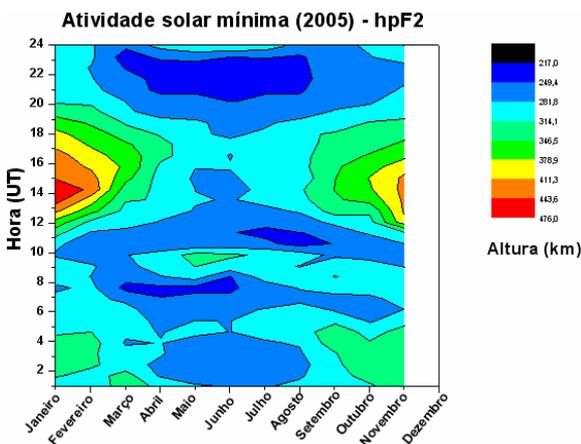


Figura 5 - Variação do parâmetro hpF2 para os meses de janeiro a novembro de 2005, para atividade solar mínima.

As Figuras 4 e 5 mostram a variação diurna do parâmetro altura real do pico da camada (hpF2), em função da hora (UT) e dos meses do ano.

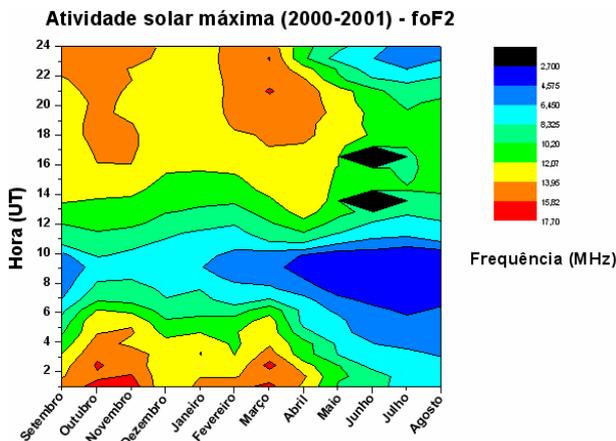


Figura 6 - Variação diurna do parâmetro foF2 para os meses de setembro de 2000 a agosto de 2001, para atividade solar máxima.

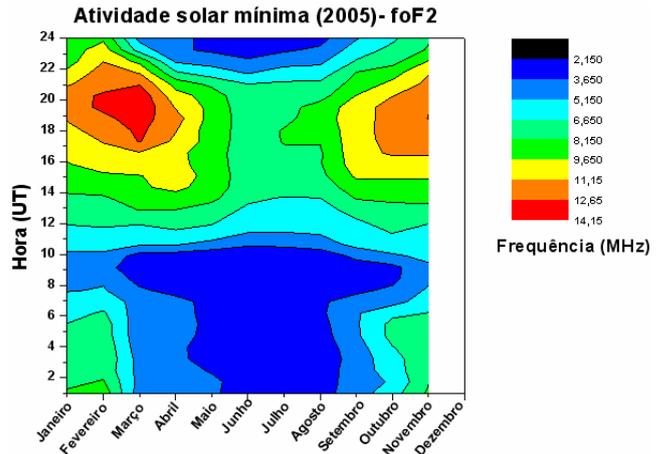


Figura 7 - Variação do parâmetro foF2 para os meses de janeiro a novembro de 2005, para atividade solar mínima.

As Figuras 6 e 7 mostram a variação diurna do parâmetro frequência crítica da camada F (foF2), em função da hora (UT) e dos meses do ano.

### Discussão

A ionosfera tem sido objeto de estudo pois ela tem um papel importante no ambiente terrestre, e com as desenvolvimento de novas tecnologias relacionadas a telecomunicações e posicionamento Global.

Neste estudo caracterizou-se a região F da ionosfera utilizando 3 parâmetros: h'F, foF2 e hpF2.

### Variação do parâmetro h'F

Durante o período de atividade solar máxima, a altura mínima virtual (h'F), teve um mínimo no horário das 13h até às 19h UT (10h - 16h LT), com alturas que variaram de 190 km até 230 km em todos os meses do ano. Os meses de outubro, novembro, dezembro e janeiro, apresentaram um máximo, chegando a 314 km, no horário das 22h até 24h UT (19h - 21h LT), já no mesmo horário, para os meses de junho o julho, os valores foram próximos a 190 km. No horário das 0h até às 8h UT (21h - 5h LT), a camada variou com os meses do ano, apresentando valores de 280 km no mês de dezembro e 210 km no mês de maio e junho.

No período de atividade solar mínima, o parâmetro h'F, no horário da 0h ate às 10h UT (21h - 7h LT), a altura variou entre 230 km e 297 km, para todos os meses do ano, encontrando o seu máximo no horário das entre 8h e 10h UT, nos meses de maio, junho e julho. No horário entre 10h e 12h UT (7h - 9h LT), a camada se comportou de forma quase uniforme para todos os meses do ano, com valores de aproximadamente 230 km. Para o horário da 12h até 24h UT (9h - 21h LT), o parâmetro apresentou valores maiores

para os meses de setembro outubro e novembro, com máximos de 256 km.

Comparando o h'F para atividade solar máxima e mínima, nota-se uma grande diferença da altura virtual, principalmente para os meses de novembro e dezembro, chegando a diferenças de 70km. O comportamento do parâmetro mostra claramente, um aumento da altura para a atividade solar máxima ao entardecer. Verifica-se uma intensificação do Pico de pré-reversão durante a atividade solar máxima e meses de verão, que ocorre devido à geração de um campo elétrico na direção leste-oeste que "empurra" a camada F para cima. Para o verão a altura da base da camada é mais elevada, pois neste período há uma maior incidência de radiação solar devido sua posição em relação ao sol.

### **Varição do parâmetro hpF2**

Durante a atividade solar máxima, o parâmetro altura do pico da camada (hpF2) apresentou, durante os meses de maio a agosto, uma altura constante, variando de 280 km até 360 km, durante todas as horas do dia, com mínimos nos horários entre 2h às 4h, 5h às 7h, 11h às 13h e 20h às 23h UT. Para o horário entre 11h e 22h UT, durante os meses de setembro a abril, o parâmetro apresentou as maiores alturas, tendo um máximo de 560 km, nos meses de dezembro e janeiro, no horário das 12h às 15h UT (9h - 12h LT). No horário das 0h até às 2h, para os meses de abril, maio, junho, julho e agosto, houve uma média de 280 km, para setembro, outubro, novembro, fevereiro e março, os valores estavam próximos de 360 km, já para os meses de dezembro e janeiro, apresentava valores de 400 km.

Durante o período de atividade solar mínima, os meses de abril a agosto apresentaram características parecidas, com valores mínimos de 250 km, para o horário entre 21h e 23h UT (18h – 20h LT) e valores máximos de 346 km às 9h UT (6h LT). De janeiro a abril e de setembro a novembro, houve máximos na altura, nos horários entre 11h e 20h UT (8h – 17h LT), com a altura mais alta de 476 km, no mês de janeiro, entre as 13h e 15 h UT (10h – 12h LT).

O valor médio da altura de hpF2 para a atividade solar máxima tem aproximadamente 80 km a mais em relação à média da altura para a atividade solar mínima. Durante o período diurno há na atmosfera neutra um processo de fotoionização no topo da camada gerando o movimento aparente da camada para cima, combinado com a deriva vertical ExB para cima, pela ação de um campo elétrico (leste-oeste), por esse motivo, é que se pode encontrar os valores mais altos no gráfico, no período entre 11h e 20h UT. Pode se observar que o máximo em hpF2 é

mais elevado nos anos de atividade solar máxima, estando compatível com o observado para h'F.

### **Varição do parâmetro foF2**

Para a atividade solar máxima, o parâmetro máxima frequência em que ocorreu a reflexão (foF2), apresentou valores mínimos no horário entre 6h e 10h UT (3h-7h LT), durante os meses de abril a agosto. Nos meses de setembro, outubro, novembro, fevereiro, março e abril, entre as 16h e 4h UT (13h - 1h LT), apresentou valores de 16 MHz, com máximos de 17 MHz, nos horários de 0h à 2h, nos meses de outubro, novembro e março.

Para atividade solar mínima, o parâmetro foF2, apresentou os valores máximos no período de 17h às 21h, nos meses de janeiro, fevereiro, março, abril, outubro e novembro, com valores entre 11 e 14 MHz. Entre o período de 23h à 10h UT (20h - 7h LT), o parâmetro apresentou os valores mais baixos, com frequências que variaram de 2 MHz à 5 MHz.

A presença dos campos eletromagnéticos exerce uma grande influência na distribuição de ionização e dinâmica, devida essa camada possuir a maior densidade de elétrons. O comportamento da frequência crítica, que mede o pico da densidade eletrônica, é semelhante para os dois anos, apesar de na atividade solar máxima o parâmetro apresentar 3 MHz a mais do que na atividade solar mínima. No período noturno há um decréscimo contínuo até o amanhecer.

No período que compreende entre os meses de setembro, outubro e novembro no horário das 0h até às 8h UT, há a maior diferença entre os dois anos, pois enquanto a atividade solar máxima apresenta valores entre 10,5MHz e 17,7MHz, a atividade solar mínima tem valores entre 2,5MHz e 8,5MHz. Para o mesmo período para o horário entre 22h e 24h UT, para o ano de 2000 há valores próximos de 16MHz, enquanto para o ano de 2005 esses valores não ultrapassam os 10MHz. Nos meses de fevereiro, março e abril, no período da 0h até às 6h UT, durante a atividade solar máxima, apresentava picos de frequência de 17,7MHz, enquanto que no mesmo horário para o ano de 2005, o valor máximo registrado foi de 9,65 MHz em uma pequena faixa de horário próximo a 0hUT.

### **Conclusão**

Esta investigação possibilitou estudar o comportamento da região F durante os períodos de atividade solar máxima e mínima.

Para a atividade solar máxima, os parâmetros ionosféricos foF2, hpF2 e h'F, sempre apresentam valores superiores do que os observados durante a atividade solar mínima. Porém o comportamento

anual é semelhante para as duas atividades solares (máxima e mínima).

### Referências

[1] SILVA, A.V.R. **Nossa estrela: o Sol**. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2006. 166p.

[2] Hishbeth, H.; Garriott, O.K. **Introduction to ionospheric Physics**. London: Academic Press, May 1969.

[3] International Service of Geomagnetism Índices, Internet site adress:

<http://ftp.gwdg.de/pub/geofhgs/kp-ap/tab/>

Acessado em: 16/03/2008

[4] Klausner, V; Fagundes, P.R. Estudo da ionosfera sobre São José dos Campos durante o período de atividade solar máxima, anos 2000 e 2001. Anais IX Encontro Latino de Iniciação Científica.

[5] Martinolli, K; Fagundes, P.R, Klausner, V, Estudo da ionosfera sobre São José dos Campos durante o período de atividade solar máxima (2000-2001) e mínima (2005). Anais XI Encontro Latino de Iniciação Científica.