

# ESTUDO DO COMPORTAMENTO DA REGIÃO F DURANTE PERÍODOS GEOMAGNETICAMENTE PERTURBADOS PARA ATIVIDADE SOLAR MÁXIMA (2000-2001) E MÍNIMA (2005)

**Karina Martinolli dos Santos**<sup>1</sup>, **Paulo Roberto Fagundes**<sup>2</sup>, **Virgínia Klausner**<sup>3</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, email: karina\_martinolli@yahoo.com.br

<sup>2</sup> Orientador, Avenida Shishima Hifumi, 2911, Urbanova, São José dos Campos, SP, 12244-000, email: fagundes@univap.br

<sup>3</sup> Universidade do Vale do Paraíba – UNIVAP, Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento – IP&D, São José dos Campos, SP, email: viklausner2001@yahoo.com.br

**Resumo** - Utilizando uma ionossonda digital localizada em São José dos Campos (23°S), região do pico da anomalia equatorial, durante os períodos de atividade solar máxima (setembro de 2000 a agosto de 2001) e mínima (janeiro a dezembro de 2005), estudou-se a variação diária dos parâmetros que caracterizam a ionosfera h'F (altura virtual mínima da camada F), hpF2 (altura do pico da camada F) e foF2 (frequência crítica), para os dias geomagneticamente perturbados. Posteriormente compararam-se as observações realizadas durante os períodos geomagneticamente perturbados com os dias geomagneticamente calmos. Com os resultados foi possível notar picos para os parâmetros analisados durante os dias perturbados, principalmente nos dias onde há a fase principal (utilizando o índice Dst) de tempestades magnéticas.

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

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

## Introdução

A ionosfera é a porção ionizada da atmosfera terrestre localizada acima de 60km de altitude, é um plasma eletricamente neutro, formado por íons e elétrons livres. Sabe-se que o plasma ionosférico é fortemente afetado pelas alterações nos níveis de radiação solar, principalmente os raios ultravioletas e raios-X. A ionosfera é constituída basicamente por camadas: camada D (entre 75-90km), camada E (entre 90-150km) e camada F, que pode ser dividida em F1 (entre 150-200km) e F2 (acima de 200km). A camada F, em especial, sofre grandes variações em função do ciclo solar.

O ciclo solar de 11 anos pode ser descrito como um período no qual o número de manchas solares cresce e atinge um máximo, decrescendo em seguida. As manchas indicam a presença de fortes campos magnéticos na superfície solar. As manchas solares estão fortemente relacionadas com a ocorrência de explosões solares (coronal mass ejection e solar flare) que por sua vez está associada a um grande acréscimo na quantidade radiação e de alterações significativas no vento solar. Estes eventos solares podem causar tempestades geomagnéticas e perturbar significativamente a dinâmica e acoplamento da termosfera e ionosfera.

Próximo ao equador magnético e nas regiões da aurora polar, flui intensas correntes elétricas que recebem o nome de eletrojatos. Em ocasiões de perturbações geomagnéticas os campos elétricos ionosféricos, podem crescer consideravelmente em relação ao seu valor médio causando uma variação acentuada da distribuição

vertical do plasma ionosférico, devido a componente vertical da velocidade de deriva. Os principais efeitos causados na ionosfera, pelos os campos elétricos, são de ordem dinâmica, isto é, sua influência está diretamente ligada ao transporte de matéria ionizada.

Para estabelecer o grau de perturbação do campo magnético se utiliza tradicionalmente o índice Dst. O índice Dst – *Disturbance storm time* - monitora o nível de atividade geomagnética e é obtido através da componente horizontal (média) do campo magnético de estações em médias e baixas latitudes. Quanto mais negativo for o índice Dst, mais intensa é a tempestade geomagnética devido às variações no anel de corrente que flui na direção leste-oeste no plano equatorial. O anel de corrente surge devido ação da diferencial deriva oposta entre íons (sentido leste-oeste) e elétrons (sentido oeste-leste) que gera uma corrente resultante na direção leste-oeste. Estes efeitos são fortemente intensificados por aumento da população das partículas aprisionadas em regiões de órbitas geossíncronas durante as tempestades geomagnéticas. A figura 1 apresenta o gráfico do índice Dst – para o mês de Abril, 2001, em função dos dias (variação do campo geomagnético, nT).

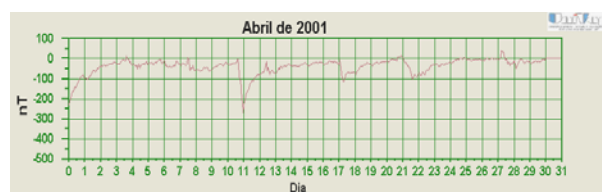


Figura 1- Variação mensal do índice DST correspondente ao mês de Abril de 2005.

Uma tempestade magnética caracteriza-se por três fases: (1) Um início súbito – *sudden commecent* – ou fase inicial, esta associada ao aumento da pressão dinâmica, incidência de partículas do vento solar, que comprime a magnetosfera indicando um aumento brusco no campo magnético. (2) Fase principal – *main phase* – caracterizada por uma redução na intensidade do campo magnético na Superfície Terrestre, essa redução esta associada a Corrente de Anel e (3) Uma fase de recuperação – *recovery phase* – caracterizada pela diminuição e eliminação gradual da pressão passando a predominar os processos de perda da Corrente de Anel. A Figura 2 mostra as fases de uma tempestade magnética.

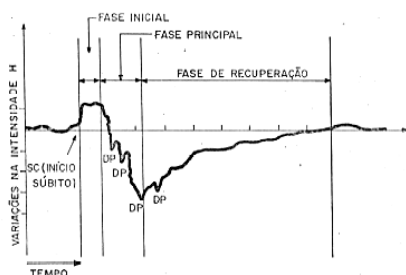


Figura 2- Fases características de uma tempestade magnética.

Podemos classificar uma tempestade magnética de acordo com a sua intensidade que é fornecida pelo índice Dst, conforme mostrado na Tabela 1.

TABELA 1 – Classificação das Tempestades Magnéticas.

Intensidade da Tempestade	Dst (nT)
Muito Intensa	< - 250
Intensa	- 100 a - 250
Moderada	-50 a - 100
Fraca	-30 a -50

## Materiais e Métodos

Para desenvolver esse trabalho foram utilizados os dados obtidos por uma ionossonda digital localizada na cidade de São José dos Campos (23°S) durante o período de 2000, 2001 e 2005. Os dados coletados são processados pelo programa “UNIVAP Digital Ionosonde Data Analysis” (UDIDA). Em seguida, são visualizados em forma de gráficos, chamados ionogramas.

Os ionogramas gerados pela ionossonda são analisados e interpretados para se obter os parâmetros ionosféricos, tais como as frequências de plasma das camadas ionosféricas, ou frequências críticas de reflexão das camadas E, F1 e F2, ou seja,  $f_0E$ ,  $f_bE_s$ ,  $f_0E_s$ ,  $f_0F1$ ,  $f_0F2$  e suas respectivas altitudes  $h'E$ ,  $h'Es$ ,  $h'F1$ ,  $h'F2$ ,  $h_pF2$  e  $hmF2$ .

A Figura 3 mostra um gráfico de frequência (MHz) em função da altura (km), o traço mostrado no gráfico são as reflexões que ocorreram na

camada F da ionosfera. Nesta figura são extraídos três parâmetros ionosféricos importantes: altura mínima virtual da camada F ( $h'F$ ), máxima frequência em que ocorreu a reflexão ( $foF2$ ) e altura do pico da camada F ( $hpF2= h[0.834xfoF2]$ ).

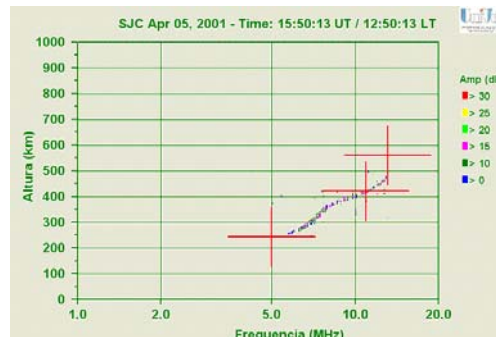


Figura 3 - Ionograma obtido em São José dos Campos (SP) em 05 de abril de 2001, 15:50 UT.

Utilizando o índice DST foi possível identificar os dias geomagneticamente perturbados (com tempestade solar) nos meses analisados. Como critério de análise foram consideradas as tempestades intensas e muito intensas (valores menores que -100nT).

Depois de encontrados os dias perturbados, uma média mensal foi feita possibilitando a comparação da variação dos parâmetros durante a atividade solar máxima e mínima, tanto para os dias calmos e perturbados.

## Resultados

As Figuras de 4 à 9 mostram a variação mensal dos parâmetros ionosféricos dos dias calmos e perturbados no período de atividade solar máxima e mínima. Cada figura apresenta quatro gráficos, nos meses de Fevereiro (verão), Julho (inverno), Abril (outono) e Setembro (primavera). Os pontos em preto indicam os dados obtidos para os dias calmos de cada mês, enquanto a linha vermelha representa a média mensal e os pontos em azul os dias perturbados. Utilizaram-se três parâmetros ( $h'F$ ,  $hpF2$  e  $foF2$ ) para estudar o comportamento da camada F da ionosfera em função do ciclo solar.

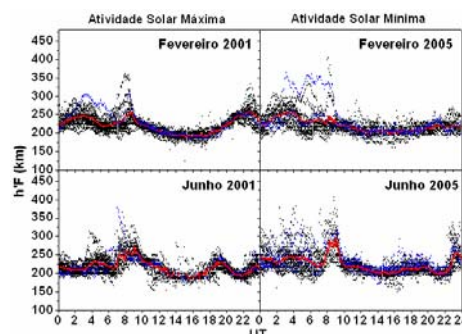


Figura 4 - Variação diurna do parâmetro  $h'F$  para os meses de fevereiro (verão) e julho (inverno) em função do ciclo solar.

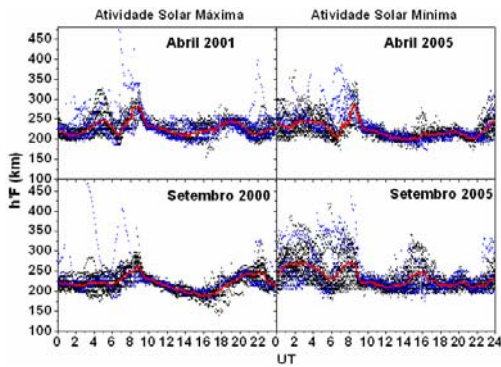


Figura 5 - Variação do parâmetro h'F para os meses de abril (outono) e setembro (primavera) em função do ciclo solar.

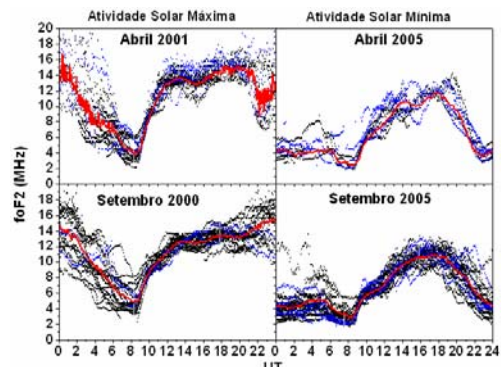


Figura 9 - Variação do parâmetro foF2 para os meses de abril (outono) e setembro (primavera) em função do ciclo solar.

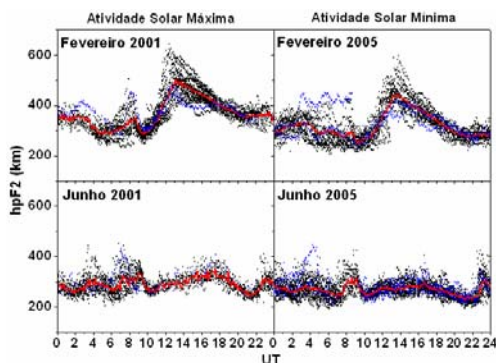


Figura 6 - Variação diurna do parâmetro hpF2 para os meses de fevereiro (verão) e julho (inverno) em função do ciclo solar

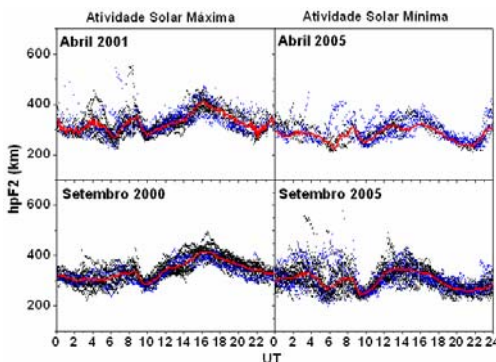


Figura 7 - Variação do parâmetro hpF2 para os meses de abril (outono) e setembro (primavera) em função do ciclo solar.

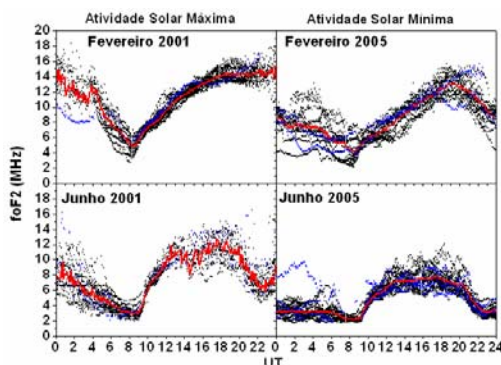


Figura 8 - Variação do parâmetro foF2 para os meses de fevereiro (verão) e julho (inverno) em função do ciclo solar.

## Discussão

A camada F é dominada por processos dinâmicos, provocando variações nos parâmetros h'F, hpF2 e foF2. A presença dos campos eletromagnéticos exerce uma grande influência na distribuição de ionização e dinâmica, devida essa camada possuir a maior densidade de elétrons. Pode-se relacionar a frequência com a densidade de elétrons através da equação:  $N_e = 1,24 \times 10^4 \times f^2$  ( $\text{cm}^{-3}$ ), onde  $f$  é dado em MHz.

## Variação do parâmetro h'F

As Figuras 4 e 5 mostram um gráfico da variação diurna do parâmetro h'F (altura virtual, km). O comportamento médio da curva mostra uma variação acentuada ao entardecer. Verifica-se pico máximo de altura (300 km) por volta das 22:30 UT, para os meses de setembro, 2000 e fevereiro, 2001. Esse pico denomina-se "Pico de pré-reversão", ocorre devido à geração de um campo elétrico na direção leste-oeste que "empurra" a camada para cima. Entretanto para os meses de abril (2001-2005), junho (2001-2005), fevereiro, 2005 e setembro, 2005 esse pico não é tão evidente, devido a deriva apresentar variação sazonal e com o ciclo solar.

Fica clara uma grande variação na altura virtual mínima da camada nos dias 1 e 12 de abril de 2001 e 18 de setembro de 2000. Esses dias, que são perturbados, estão na fase principal da tempestade magnética.

Para os outros meses, há sempre a presença de picos da densidade camada F2 durante o período noturno, vários estudos relacionam esses picos como sendo uma combinação de aquecimento (efeito Joule), processos químicos e efeitos de transporte de plasma, provocados pelas tempestades geomagnéticas.

## Variação do parâmetro hpF2

As Figuras 6 e 7 mostram a variação diurna de hpF2. Como visto anteriormente, a curva média apresenta uma variação ao entardecer entre as

10:00 – 21:00 UT (7:00 – 18:00 LT). Durante este período a atmosfera neutra começa um processo de fotoionização no topo da camada gerando o movimento aparente da camada para cima. Combinado com uma deriva vertical para cima, pela ação de um campo elétrico (leste-oeste). Pode-se observar que os dados de dias perturbados apresentam um pouco acima ou um pouco abaixo da curva média referente à tempestade positiva (início súbito) ou tempestade negativa (fase principal e de recuperação).

Durante o período noturno, os dados de dias perturbados apresentam uma grande variação em relação à média dos dias calmos, com picos de densidade eletrônica.

Para o mês de abril de 2005 a densidade eletrônica apresentou um declínio significativo, pois não houve leitura de dados pela ionossonda, devido à falta de reflexão das ondas de radiofrequência.

### Variação do parâmetro foF2

As Figuras 8 e 9 mostram um gráfico da variação diurna do parâmetro foF2 (frequência em MHz). O comportamento médio mostra claramente uma variação durante o dia, que está intimamente relacionada com o processo de fotoionização. Após o pôr do Sol, ocorre uma diminuição paulatina da frequência, justificado pelo processo de recombinação dos pares íons-elétrons ao anoitecer.

Verifica-se também, a ocorrência de um espalhamento dos dados a partir das 22:00 UT. A grande variabilidade dos dados pode ser explicada pelos processos aleatórios como: movimentação da anomalia equatorial, propagação de ondas de gravidade e ondas planetárias que podem afetar a densidade do plasma ionosférico.

Para os dias geomagneticamente perturbados, os dados apresentam picos de densidade eletrônica, durante o período noturno. Devido aos períodos perturbados, surgem ventos no sentido do equador como também, TIDs vindo de ambas regiões polares que perturbam o vento meridional, conseqüentemente ocorre difusão do plasma através das linhas de campo magnético, apresentando picos de densidade eletrônica durante a noite, tais como mostra a figura 9 para os meses de abril e setembro.

### Conclusão

Utilizados dados de sondagem ionosférica durante os anos de 2000-2001 e 2005 pode-se dizer que:

- Os parâmetros ionosféricos (foF2, h'F e hpF2) apresentam uma variação diurna bem característica.

- Existe uma variação sazonal destes parâmetros durante o máximo solar e mínimo solar.
- Os parâmetros ionosféricos foF2, h'F e hpF2 são afetados durante períodos geomagneticamente perturbados, por TIDs e campos elétricos.

### Referências

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

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

- 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.

- CECATTO, José Roberto. O Sol. In: Curso de Introdução à Astronomia e Astrofísica, 9., 2006, São José dos Campos. Resumo. São José dos Campos: INPE, 2006.

- International Service of Geomagnetism Índices, Internet site adress:  
<http://ftp.gwdg.de/pub/geofhgs/kp-ap/tab/>  
Acessado em: 29/01/2007