

ESTUDO DA IONOSFERA SOBRE SÃO JOSÉ DOS CAMPOS DURANTE O PERÍODO DE ATIVIDADE SOLAR MÁXIMA (2000 – 2001) E MÍNIMA (2005).

Karina Martinolli dos Santos¹, **Paulo Roberto Fagundes**², **Virgínia Klausner de Oliveira**³

¹ 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

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

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

Resumo – Recentes estudos comprovaram que a variação média solar mais importante é de aproximadamente 11 anos. As alterações nos níveis de radiação solar, principalmente os raios ultravioletas e raios-X (ondas curtas) e ondas de rádio (ondas muito longas) ocorrem devido ao ciclo de 11 anos apresentando uma forte variação. Assim, a resposta da camada ionizada terrestre (ionosfera) sofre mudanças significativas em função da variação do ciclo solar, visto que a radiação ultravioleta e raio-X são os principais agentes ionizantes. Este trabalho tem o objetivo de estudar a resposta da ionosfera em baixas latitudes em função do ciclo solar. Utilizou-se as observações por rádio sondagem (ionossonda) em São José dos Campos (23°S) durante o período 2000 -2001 (atividade solar máxima) e 2005 (atividade solar mínima). Estudou-se a variação diária dos parâmetros ionosféricos altura mínima da camada F (h'F), frequência crítica (foF2) e a altura real do pico da camada F (hpF2) para caracterizar a ionosfera. Posteriormente, foi realizada uma média mensal destes parâmetros e analisou-se as mudanças sazonais em função do ciclo solar, comparando também com o modelo IRI.

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

Área do Conhecimento: I - Ciências Exatas e da Terra

Introdução

A percepção do Sol, pelo homem, é conhecida há muito tempo. Fato importante são os registros de desenhos do astro inscritos em rochas da época pré-histórica. Essa fascinação rendeu, ao homem, um grande conhecimento do astro-rei. Historicamente, a curiosidade em seu estudo, começou a milhares de anos antes de Cristo, mas seu estudo só tornou-se concreto, a partir do século XVII, com as observações feitas por Galileu e sua luneta.

O Sol é uma esfera de gás autogravitante. Por ser muito quente, seus átomos se encontram na forma de íons, formando um estado de plasma (íons e elétrons), por isso, não gira como uma esfera sólida. Próximo aos pólos, apresenta uma rotação de aproximadamente 34 dias, enquanto no equador é de aproximadamente 26 dias. Esse fenômeno é conhecido como rotação diferencial. Em decorrência da rotação diferencial, criam-se intensos campos magnéticos, geralmente próximos ao equador. As manchas solares são manchas escuras na superfície solar e o seu aparecimento ocorre devido à presença dos fortes campos magnéticos. O ciclo solar de 11 anos pode ser relacionado com a variação no número de

manchas solares que cresce e atinge um máximo (período de máximo solar), decrescendo em seguida (período de mínimo solar). A observação de radiação solar no comprimento de onda F 10,7cm pode ser diretamente relacionada com o número de manchas solares sendo de fundamental importância para o entendimento do ciclo solar (figura 1).

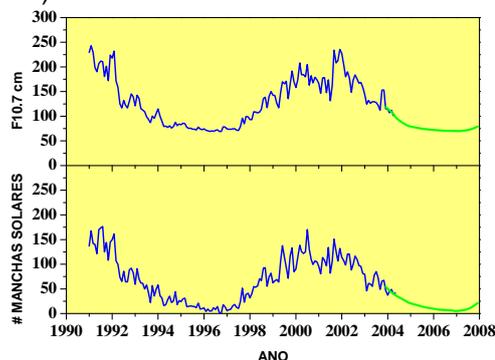


Figura 1. Evolução temporal do número de manchas solares e da radiação F10.7 cm durante o último ciclo solar, bem como a previsão para os próximos anos (linha verde).

A radiação solar, principalmente nos comprimentos de onda do ultravioleta (UV), extremo-ultravioleta (EUV) e raio-X (RX) são absorvidas pela atmosfera terrestre produzindo a

ionização dos constituintes atmosféricos, pelo processo de fotoionização. A porção atmosférica ionizada é denominada ionosfera. A ionosfera é definida como a região que se apresenta como um plasma parcialmente ionizado com porção de átomos e moléculas eletricamente carregados pela adição ou remoção de elétrons, produzindo íons (atômicos e/ou moleculares) e elétrons livres. O plasma ionosférico é fortemente afetado pelas alterações nos níveis de radiação solar (UV, EUV e RX), portanto apresenta variações diurna, sazonais e com ciclo solar.

Os limites, inferior e superior, da ionosfera não se apresentam bem definidos, entretanto abaixo de 70 Km e acima de 1000 Km a densidade eletrônica se torna muito pequena ($< 10^3 \text{ Ne/cm}^3$).

De acordo com a distribuição eletrônica pode-se dividir a ionosfera em 3 regiões: Região D, Região E, e Região F (dividida em camadas F1 e F2). A região F, durante a noite, pode ser encontrada na faixa de 250km, enquanto que, durante o dia, pode ser dividida em duas camadas: F1 e F2, localizadas em 200km e 300km, respectivamente. A região F apresenta os seguintes parâmetros: altura virtual mínima da camada F (h'F), frequência crítica (foF2) e a altura real do pico da camada (hpF2).

A ionosfera, por ser formada por partículas eletricamente carregadas, faz com que as ondas eletromagnéticas sejam refratadas, refletidas ou absorvidas. Pelo fato da região F ser a responsável pela reflexão 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.

Materiais e Métodos

No desenvolvimento desse trabalho foram utilizados os dados obtidos durante os anos de 2000, 2001 e 2005 por uma ionossonda digital localizada na cidade de São José dos Campos (23°S). As informações coletadas são processadas pelo programa "UNIVAP Digital Ionosonde Data Analysis" (UDIDA).

A figura 2 mostra um gráfico de frequência (MHz) em função da altura (km), o traço mostrado no gráfico apresenta as reflexões que ocorreu devido da camada F da ionosfera. Nesta figura são extraídos três parâmetros ionosféricos importantes (h'F, hpF2 e foF2). O parâmetro h'F (altura mínima virtual da camada F), foF2 (máxima frequência em que ocorreu a reflexão) e hpF2 ($hpF2 = h \times (0.834 \times foF2)$).

Utilizando esses parâmetros é possível gerar a média mensal como mostra o gráfico de h'F (figura 3) em função da altura (km) por hora (24hs) UT,

onde $UT = LT + 3 \text{ hs}$ (LT é hora local). Com a variação média mensal é possível comparar a variação dos parâmetros durante a atividade solar máxima e mínima.

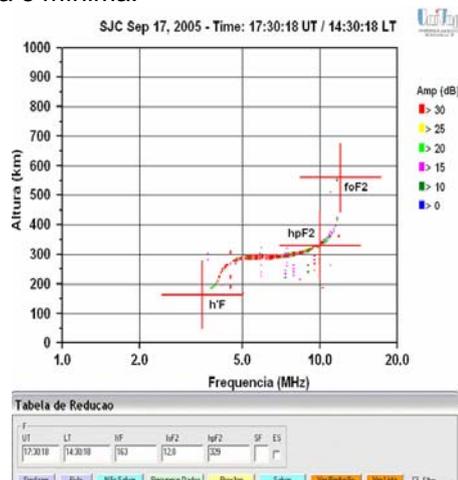


Figura 2 - Ionograma obtido em São José dos Campos (SP) em 17 de setembro de 2005, 14:30 UT.

Para identificar os dias calmos dos dias perturbados dos meses analisados foi utilizado 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.

Também foi utilizado os parâmetros do modelo IRI-2001 (*International Reference Ionosphere (IRI) – 2001*). O modelo IRI é utilizado para prever o comportamento ionosférico em uma determinada coordenada (geográfica/geomagnética) e foi desenvolvido utilizando dados observados em vários lugares ao redor do mundo. Portanto, foi possível comparar com os parâmetros foF2 e hpF2 obtidos em São José dos Campos com o modelo IRI. Foi considerado o dia 15 de cada mês como referência para a comparação com a média mensal.

Resultados

As figuras abaixo mostram a variação mensal dos parâmetros ionosféricos dos dias calmos 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 a linha azul é a variação do modelo IRI-2001 para o parâmetro altura real máxima (hmF2) e foF2.

As Figuras 3 e 4 mostram a variação diurna do parâmetro altura mínima virtual da camada F (h'F), em função do ciclo solar.

As Figuras 5 e 6 mostram a variação diurna do parâmetro altura real do pico da camada (hpF2),

em função do ciclo solar. A altura real máxima é bem próxima ao pico da camada, principalmente à noite.

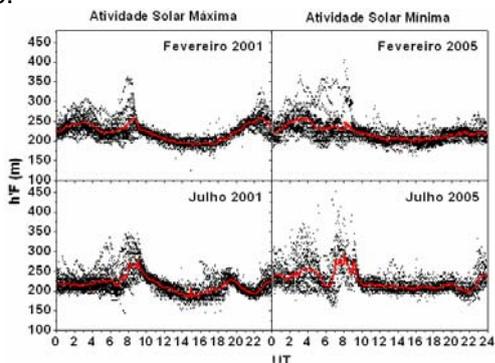


Figura 3 - Variação diurna do parâmetro h'F para os meses de fevereiro (verão) e julho (inverno) em função do ciclo solar.

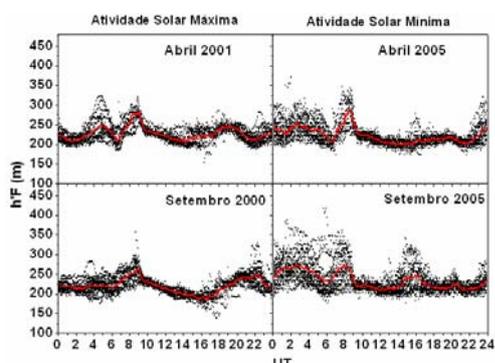


Figura 4 - Variação do parâmetro h'F para os meses de abril (outono) e setembro (primavera) em função do ciclo solar.

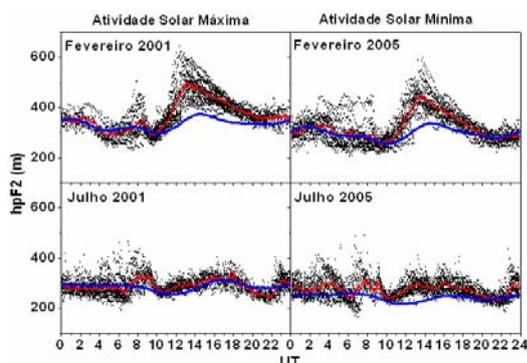


Figura 5 - Variação diurna do parâmetro hpF2 para os meses de fevereiro (verão) e julho (inverno) em função do ciclo solar

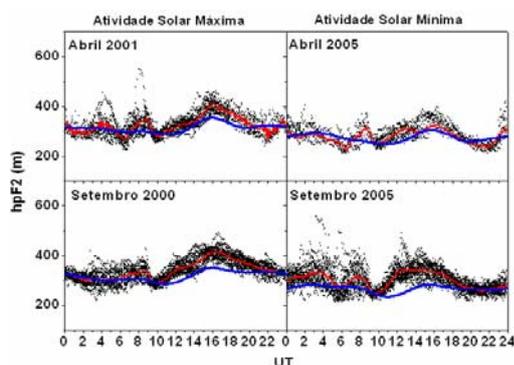


Figura 6 - Variação do parâmetro hpF2 para os meses de abril (outono) e setembro (primavera) em função do ciclo solar.

As Figuras 7 e 8 mostram a variação diurna do parâmetro frequência crítica da camada F (foF2), em função do ciclo solar.

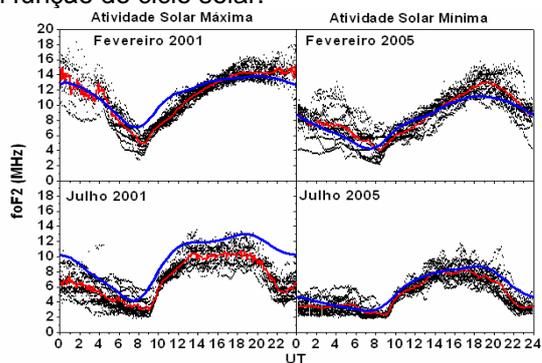


Figura 7 - Variação diurna do parâmetro foF2 para os meses de fevereiro (verão) e julho (inverno) em função do ciclo solar .

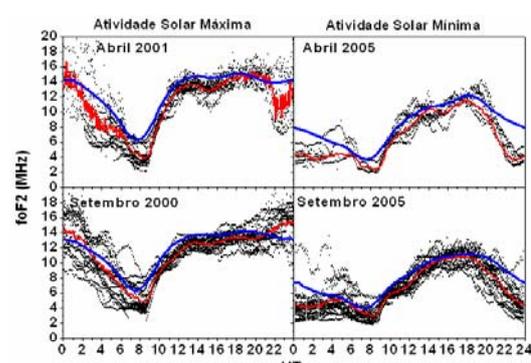


Figura 8 - Variação do parâmetro foF2 para os meses de abril (outono) e setembro (primavera) em função do ciclo solar.

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:

$N_e = 1.24 \times 10^4 \times f^2$ (#/cm³), onde f é dado em MHz.

Variação do parâmetro h'F

Na figura 3 e 4, o comportamento diurno da altura mínima é muito semelhante durante a atividade solar máxima e mínima, com um pico próximo às 09:00 UT (em torno dos 260 km), no inverno, verão e outono correspondente ao horário de transição (amanhecer). Verifica-se pico máximo de altura (260 km) por volta das 22:30 UT. Esse pico denomina-se "Pico de pré-inversão", ocorre devido ao aparecimento de campo elétrico zonal de polarização na direção leste-oeste que intensifica a deriva vertical ExB e consequentemente "empurra" a camada para cima. Entretanto, o pico de pré-inversão apresenta

variação sazonal e com ciclo solar, sendo pouco perceptível durante os meses de atividade solar mínima. Em fevereiro de 2001, durante o período entre 22:00 às 24:00 UT, a camada estava em 220km e teve um aumento contínuo até chegar em 260km, enquanto no mesmo período de fevereiro de 2005, ela permaneceu quase constante na faixa dos 220km.

Varição do parâmetro hpF2

O valor médio de hpF2 para o fevereiro de 2001 apresenta um máximo de aproximadamente 500km no período da tarde às 13:00 UT. 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 a deriva vertical ExB para cima, pela ação de um campo elétrico (leste-oeste). O modelo IRI-2001, não acompanha esse movimento da camada para o mês de fevereiro, apresenta valores menores, chegando a uma diferença de aproximadamente 140km. Durante o mês de julho 2001, não apresenta diferença significantes entre os dados obtidos e o modelo IRI, entretanto para julho 2005, o modelo IRI apresenta valores menores. Nos meses de fevereiro, abril e setembro, o parâmetro apresenta um pico entre 14:00 e 18:00 UT, sendo pouco perceptível em julho, tanto na atividade solar máxima quanto na atividade solar mínima devido à incidência diferencial de radiação solar.

Varição do parâmetro foF2

Como é possível relacionar a densidade eletrônica com a frequência, o parâmetro foF2 consegue mostrar o pico da densidade eletrônica da região F. Esse parâmetro obtido é muito semelhante ao sugerido pelo modelo IRI-2001, apresentando uma pequena variação, no período entre 00:00 e 02:00 UT, para os meses de julho de 2001, abril de 2005 e setembro de 2005. Durante o mês de fevereiro de 2005, o modelo apresentou valores menores que os obtidos pela ionossonda digital. Na atividade solar máxima, observa-se pouca variação entre os parâmetros obtidos e do modelo IRI, entretanto na atividade solar mínima a densidade eletrônica encontra-se mais elevada, sendo significativamente maior no período entre as 22:00 e 24:00 UT, principalmente para os meses de fevereiro e setembro. No mês de setembro, essa diferença é muito expressiva, na atividade solar máxima, no horário das 24:00 UT, o parâmetro foF2 apresenta valor de 16MHz, enquanto que na atividade solar mínima, esse valor é de 4MHz. Devido à grande quantidade de dias perturbados no mês de abril, o gráfico se apresenta com uma quantidade menor de dados que os outros meses.

Verifica-se também, a ocorrência de um espalhamento dos dados a partir das 20:00 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.

Conclusão

A análise da comparação dos valores dos parâmetros ionosféricos (h'F, hpF2 e foF2) para os dias calmos, mostram algumas diferenças entre a atividade solar máxima e a atividade solar mínima. Para a atividade solar máxima, os parâmetros ionosféricos foF2, hpF2 e h'F, sempre apresentam maiores valores que na atividade solar mínima. Para a altura mínima da base h'F, a camada é maior na atividade solar máxima que na atividade solar mínima durante o período noturno. Para parâmetro altura do pico da camada hpF2, o modelo IRI-2001 não acompanha o máximo do mês de fevereiro (atividade solar máxima e mínima) que ocorre a tarde (~ 15:00-16:00 UT, ~12:00-13:00 LT). Para a frequência crítica foF2, os valores na atividade solar máxima são maiores que na atividade solar mínima, mostrando que a densidade eletrônica neste período é maior. O modelo IRI-2001 apresenta uma boa concordância com os dados observados.

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
- IRI-2001, Internet site address: <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/space/model/models/iri.html> Acessado em: 02/04/2007