

Modelagem Ionosférica de Baixas Latitudes no Brasil para Verão de Atividade Solar Mínima

J. R. Souza*
M. A. Abdu*
I. S. Batista*
G. J. Bailey**

*Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

**University of Sheffield, England

Os parâmetros foF2 e hmF2 (frequência e altura do pico da região F ionosférica) medidos simultaneamente nas estações de Fortaleza (4°S, 38°O, latitude magnética = 3°S) e de Cachoeira Paulista (22°S, 45°O, latitude magnética = 15° S) são comparados com os resultados do modelo SUPIM (Sheffield University Plasmasphere-Ionosphere Model). Neste trabalho, também usando o modelo SUPIM e os dados observados, é apresentado um método para calcular deriva equatorial $E \times B$, fluxo solar EUV (Extremo Ultra-Violeta) e ventos termosféricos. No código do modelo SUPIM foram incluídos os efeitos da Anomalia Geomagnética Brasileira (AGB) sobre a ionosfera de Cachoeira Paulista (CP) para explicar as variações diurnas de foF2 nesta estação. Os resultados de foF2 e hmF2 calculados pelo modelo SUPIM não apresentam concordância com os dados observados, mas fazendo-se ajustes nos parâmetros de entrada (deriva equatorial $E \times B$, fluxo solar EUV e ventos termosféricos) as discordâncias são superadas. Os ajustes dos ventos são feitos não apenas sobre Fortaleza (FZ) e CP, mas também nos seus respectivos pontos conjugados.

INTRODUÇÃO

A ionosfera equatorial e de baixas latitudes sofre forte dependência da ação conjunta dos campos elétricos e geomagnéticos e ventos termosféricos (Anderson, 1973a,b; Bailey et al., 1993, Balan e Bailey, 1995; 1996; Batista et al., 1996). Outro parâmetro que também afeta, de forma direta, o comportamento da ionosfera terrestre é o fluxo solar EUV (Batista et al., 1994; De Paula et al., 1996, Balan et al., 1992). Na tentativa de entender as respostas ionosféricas devida a ação conjunta de todos esses parâmetros, dos efeitos isolados de cada um deles e também dos efeitos dos processos difusivos e químicos, surgiram, na década de 60, as modelagens ionosféricas (Hanson e Moffett, 1966; Sterling e Hanson, 1969). As modelagens ionosféricas, junto com a evolução dos recursos computacionais, se desenvolveram muito nesta última década (Stening, 1992; Bailey et al., 1993). A precisão dos resultados dos modelos ionosféricos dependem da precisão dos seus parâmetros de entrada. A maioria dos modelos teóricos ionosféricos usam os parâmetros de entrada calculados por modelos empíricos ou semi-empíricos. A precisão dos resultados dos modelos empíricos e semi-empíricos dependem da distribuição, tanto temporal como espacial, da amostra dos dados utilizados nas suas construções. Portanto, é sabido que, principalmente no hemisfério sul, não existe uma distribuição global de dados ionosféricos e isso tem refletido na precisão dos modelos empíricos e semi-empíricos. Neste trabalho, é desenvolvido um método que calcula deriva $E \times B$, fluxo solar EUV e ventos meridionais termosféricos baseando-se nos dados de h'F foF2 e hmF2 e nos resultados do SUPIM obtidos com ajustes na deriva produzida pelo método de Batista et al. (1996), no fluxo solar EUV calculado pelo modelo semi-empírico EUV94 (versão atualizada de EUV91 - Tobiska, 1991) e nos ventos termosféricos

fornecidos pelo modelo semi-empírico HWM90 (Hedin et al., 1991).

DADOS EXPERIMENTAIS

Os dados de h'F, foF2 e hmF2, usados neste trabalho, foram registrados simultaneamente em FZ e em CP. Estes dados foram obtidos a partir da redução de ionogramas produzidos por ionossondas e para transformar os dados da altura do pico da região F ionosférica de virtual, conforme fornecidas pelos ionogramas, para real foi usado o programa POLAN (Titheridge, 1985). Neste trabalho, foi feito um estudo do comportamento médio da região F ionosférica para períodos geomagneticamente calmos e foi escolhido o período de verão de atividade solar mínima. Foram selecionados 10 dias de dados, registrados nos meses de dezembro/85 e de janeiro/86, para fazer a representação média de verão de atividade solar mínima.

MÉTODO USADO PARA CALCULAR DERIVA EQUATORIAL $E \times B$, FLUXO SOLAR EUV E VENTOS MERIDIONAIS TERMOSFÉRICOS

O método usado para calcular os parâmetros ionosféricos, tais como: deriva equatorial, fluxo solar EUV e ventos meridionais termosféricos possui o seguinte procedimento: como ponto de partida usa-se o vento do modelo HWM90, a deriva obtida pelo método de Batista et al. (1996) (MDB) e o fluxo EUV do modelo EUV94. Executa-se o SUPIM com estes parâmetros para calcular variações diurnas de hmF2 e foF2 sobre FZ. Comparam-se estes resultados com os dados observados e, se em determinada hora não existir boa concordância, modifica-se a deriva até que os resultados modelados atinjam a melhor concordância com os dados experimentais. Após os ajustes na deriva,

se ainda persistirem as discordâncias entre os valores de foF2, ajusta-se o fluxo solar EUV e por último, se existir discordâncias entre os valores de hmF2, ajustam-se os ventos meridionais. De fato, no momento em que todas essas concordâncias são satisfatórias tem-se calculado a deriva equatorial $E \times B$, o fluxo solar EUV e os ventos meridionais sobre a estação de FZ.

Tendo estabelecido o padrão diurno da deriva equatorial, corrigido o fluxo EUV e os ventos meridionais de FZ, a próxima etapa, é fazer os ajustes nos parâmetros de entrada que afetam os resultados das simulações para CP. Na verdade, isso é feito se houver necessidade. Entretanto, já que está sendo feito um estudo simultâneo da ionosfera de FZ e de CP, os parâmetros ajustados de FZ são mantidos, faltando apenas ajustar os ventos e incluir os efeitos da AGB no setor de CP. O procedimento para ajustar os ventos e incluir os efeitos da AGB sobre CP é semelhante ao procedimento dos ajustes dos parâmetros de entrada das simulações para FZ, ou seja, depois que executar o SUPIM, fazendo-se as modificações dos ventos, observa se foF2 calculado apresenta valores inferiores aos dos dados experimentais, principalmente em torno das 05:00 horas (hora local). Se isso for verdadeiro inclui-se os efeitos da AGB.

Os efeitos da AGB sobre a ionosfera de CP são incluídos da seguinte maneira: calcula-se a taxa de produção por fotoionização sobre CP ao meio dia (P_{12}). Fixa-se apenas uma fração dessa taxa de produção (P_{AGB}) e adiciona-se à variação diurna da taxa de produção normal por fotoionização (P). Desta forma, inclui-se um efeito equivalente ao causado pelas precipitações de partículas na região da AGB. O valor de P_{AGB} é definido baseando-se nos dados de foF2. Todo esse procedimento poder ser facilmente entendido pela seguinte equação:

$$P_{AGB} = aP_{12}$$

onde a é encontrado fazendo-se ajustes até que foF2 calculado sobre CP concorde com os dados observados.

O modelo SUPIM usa coordenadas magnéticas, então, os efeitos da AGB são considerados na faixa de latitude magnética entre 15°-20° S para restringi-los à região de CP. Para evitar descontinuidade na taxa de produção total ($P + P_{AGB}$) foi feito uma interpolação linear nas bordas dessa faixa de latitude. Também os ajustes dos ventos são efetuadas por faixas de latitudes magnéticas para representar as mudanças nos setores de FZ, de CP e nos seus respectivos setores conjugados. As faixas de latitudes de 2°-9° S e de 14°-24° S representam os setores de FZ e de CP e as faixas de latitudes de 2°-9° N e 14°-24° N representam os setores conjugados de FZ e de CP, respectivamente.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

As Figuras 1 e 2 mostram na sequência (a), (b), (c) e (d) os perfis diurnos das derivas

eletromagnéticas, ventos meridionais magnéticos (VMM) e dados e resultados de foF2 e de hmF2 sobre FZ e CP, respectivamente. A deriva ajustada é chamada de MDA e o vento calculado pelo modelo HWM90 e o vento ajustado, os quais são obtidos em 300 km de altitude, são nomeados de MVH e MVA, respectivamente. Esses modelos de ventos são separados em quatro grupos: ventos sobre FZ e CP (ex: MVH-FZ, MVH-CP) e sobre os seus respectivos setores conjugados (ex: MVH-SCFZ, MVH-SCCP).

As Figuras 1c,d apresentam os valores médios de foF2 e hmF2 registrados em FZ. As barras de erros mostram os desvios padrões sobre estas médias. Também juntos com os valores médios de foF2 e hmF2 temos os resultados de duas execuções do SUPIM. As curvas com círculos (Fig. 1c,d) mostram os resultados de foF2 e hmF2 calculados pelo SUPIM, onde foi considerado fluxo solar EUV igual aos valores dados pelo modelo EUV94 (euvt), deriva e ventos iguais a MDB e MVH respectivamente. Essa descrição pode ser simplificada pela seguinte função:

$$\text{SUPIM}(\text{euvt}, \text{MDB}, \text{MVH}).$$

Já as curvas com losângulos mostram os resultados modelados usando deriva, fluxo solar e vento ajustados. Neste caso tem-se,

$$\text{SUPIM}(\text{euvt} * 1.25, \text{MDA}, \text{MVA}),$$

onde $\text{euvt} * 1.25$ significa que o fluxo solar EUV fornecido pelo modelo EUV94 foi aumentado em 25%. A deriva MDA e os ventos MVA (MVA-FZ, MVA-SCFZ) estão mostrados nas Figuras 1a,b respectivamente.

Comparando o primeiro resultado, SUPIM(euvt, MDB, MVH), com os dados observados pode-se ver que os valores de foF2 modelados apresentam uma boa concordância, mostrando discordância apenas entre 19:00 e 24:00 horas, mas neste horário, devido ao fenômeno de espalhamento da região F (spread-F), a representatividade dos dados é muito baixa e por isso não podemos afirmar que os resultados modelados estão corretos ou incorretos. Os resultados de hmF2 obtidos pelo SUPIM(euvt, MDB, MVH) não mostram boa concordância entre os intervalos 07:00-16:00 e 21:00-24:00 horas. Entretanto, os resultados de foF2 e de hmF2 calculados por SUPIM(euvt*1.25, MDA, MVA) mostram ótima concordância com os dados observados.

As Figuras 2c,d mostram os resultados de foF2 e de hmF2 calculados sobre CP. Estas Figuras mostram os resultados de duas simulações, uma usando o SUPIM sem ajustar os parâmetros de entrada (SUPIM(euvt, MDB, MVH)) e a outra com os ajustes nos parâmetros de entrada e incluindo os efeitos da AGB (SUPIM(euvt, MDA, MVA, AGB)). Conforme pode ser visto, uma combinação adequada do vento local de CP, do vento do seu setor conjugado e dos efeitos da AGB proporciona boa concordância entre os resultados do SUPIM e os dados experimentais.

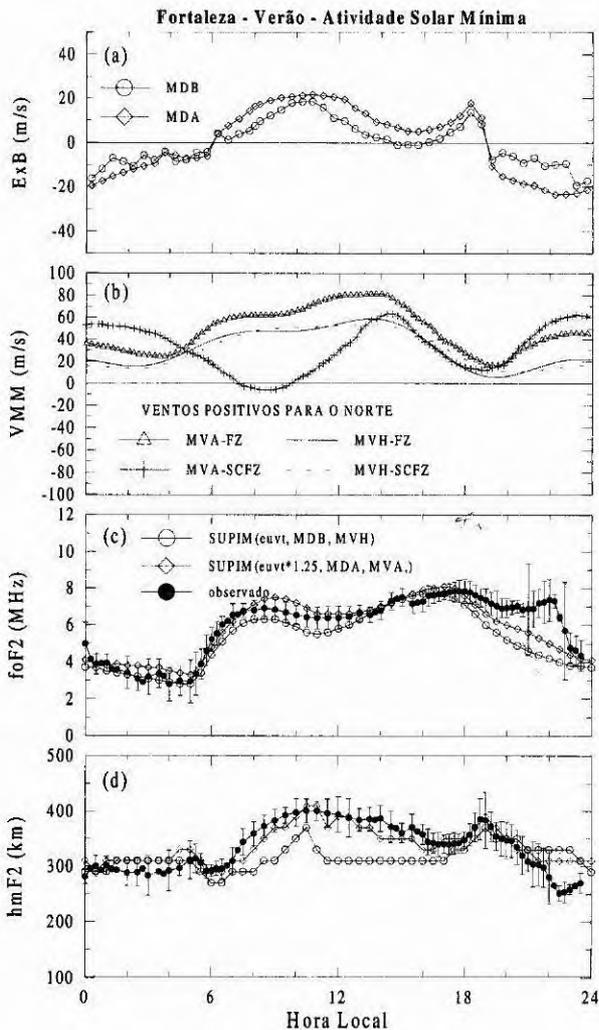


Figura 1 - (a) Derivas eletromagnéticas $E \times B$, (b) vento ao longo do meridiano magnético, (c) e (d) dados observados e resultados modelados de foF2 e hmF2 em Fortaleza.

Fazendo uma análise dos ventos para este período, verão de atividade solar mínima, constata-se grandes diferenças entre os ventos meridionais calculados neste trabalho e os ventos produzidos pelo modelo HWM90, conforme mostram as Figuras 1b e 2b. Os resultados sobre a estação de CP (Figura 2b) mostram que as diferenças mais marcantes são entre 06:00-15:00 horas e sobre o setor conjugado desta estação temos apenas um pequeno intervalo, entre 12:00-17:00, em que esses ventos apresentam intensidade um pouco mais semelhantes. No setor de FZ (Figura 1b) não temos grandes discrepâncias entre os modelos de ventos. O modelo de vento proposto para FZ apresenta-se apenas um pouco mais elevado do que o vento produzido pelo modelo HWM90. Já os resultados da comparação entre estes ventos no setor conjugado de FZ mostram grandes discrepâncias, apresentando concordância apenas no intervalo de 13:00-19:00 horas, como mostra a Figura 1b.

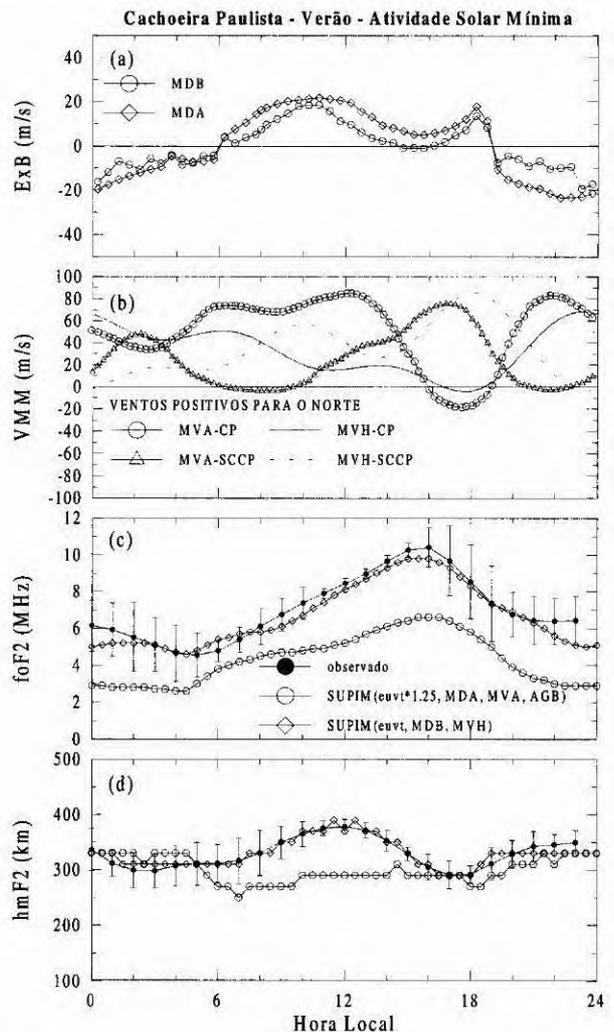


Figura 2 - (a) Derivas eletromagnéticas $E \times B$, (b) ventos ao longo do meridiano magnético, (c) e (d) dados observados e resultados modelados de foF2 e hmF2 em Cachoeira Paulista.

CONCLUSÕES

Através do modelo SUPIM e utilizando dados simultâneos de Fortaleza e de Cachoeira Paulista é possível encontrar modelos de derivas equatoriais, ventos meridionais termosféricos e calcular os parâmetros foF2 e hmF2 para a região brasileira.

De acordo com os resultados do SUPIM, obtidos com base em dados de foF2, é constatado que o modelo EUV94 está subestimando em 25% o valor do fluxo solar durante verão de atividade solar mínima.

Uma taxa de produção extra sobre Cachoeira Paulista é incluída para representar os efeitos equivalentes das precipitações de partículas na região da AGB.

Os perfis diurnos dos ventos calculados neste trabalho (ventos ajustados) discordam dos valores obtidos pelo modelo HWM90. As discordâncias acontecem tanto em Cachoeira Paulista como em

Fortaleza e também nos seus respectivos pontos conjugados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Anderson, D.N. Theoretical study of the ionospheric F region equatorial anomaly-I. *Planetary and Space Science*, 21(3):409-419, Mar. 1973a.
- Anderson, D.N. Theoretical study of the ionospheric F region equatorial anomaly-II. Results in the America and Asian sectors. *Planetary and Space Science*, 21(3):421-442, Mar. 1973b.
- Bailey, G.J., Sellek, R.; Rippeth, Y. A modelling study of the equatorial topside ionosphere, *Annales Geophysicae*, 11:263-272, 1993.
- Balan, N.; Bailey, G.J.; Jayachandran, B.; Rao, P. B. Variations of ionospheric electron content during an intense solar cycle: 1. Observations, Proc. International Beacon Satellite Symposium, MIT, USA, 1992.
- Balan, N.; Bailey, G.J. Equatorial plasma fountain and its effects: possibility of an additional layer, *Journal of Geophysical Research*, 100(A11):21421-21432, Nov. 1995.
- Balan, N.; Bailey, G.J. Modelling studies of equatorial plasma fountain and equatorial anomaly. *Advances in Space Research*, 18(3):107-116, 1996.
- Batista, I. S.; Souza, J. R.; Abdu, M. A.; De Paula, E. R. Total electron content at low latitudes and its comparison with the IRI90. *Advances in Space Research*, 14(12):87-90, 1994.
- Batista, I. S.; Medeiros, R.T.; Abdu, M.A.; Souza, J.R.; Bailey, G.J.; De Paula, E.R. Equatorial ionospheric vertical plasma drift model over the Brazilian region, *Journal of Geophysical Research*, 101(A5):10887-10892, May 1996.
- De Paula, E. R.; Souza, J. R.; Abdu, M. A.; Bailey, G. J.; Batista, I. S.; Bittencourt, J. A.; Bonelli, E. Ionospheric electron content over Brazilian low latitude and its comparison with the IRI and SUPIM models. *Advances in Space Research*, 18(6):245-248, 1996.
- Hanson, W.B.; Moffett, R.J. Ionization transport effects in the equatorial F region. *Journal of Geophysical Research*, 71(23):5559-5572, Dec. 1966.
- Hedin, A. E.; Biondi, M.A.; Hernandez, R.G.; Johnson, R.M.; Killeen, T.L.; Mazaudier, C.; Meriwether, J.W.; Salah, J.E.; Sica, R.J.; Smith, R.W.; Spencer, N.W.; Wickwar, V.B.; Virdi, T.S. Revised global model of thermosphere winds using satellite and ground-based observations. *Journal of Geophysical Research*, 96(A5):7657-7688, May 1991.
- Titheridge, J. E. Ionogram analysis with generalized program POLAN, report UAG-93, World Data Center A for Solar-Terrestrial Physics, NOAA, Boulder, CO, 80303, 1985.
- Tobiska, W.K. Revised solar extreme ultraviolet flux model. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 53:(11/12):1005-1018, April 1991.
- Stening, R. J. Modelling the low-latitude F region. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 54:1387, 1992.
- Sterling, D.L.; Hanson, W.B.; Moffett, R.J.; Baxter, R.G. Influence of electromagnetic drifts and neutral air winds on some features of the F₂ region. *Radio Science*, 4(11):1005-1023, Nov. 1969.