

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DAS COMPONENTES ZONAIS DA DERIVA DO PLASMA E DO VENTO TERMOSFÉRICO EM REGIÕES EQUATORIAIS

I.S. BATISTA e M.A. ABDU

Instituto de Pesquisas Espaciais — INPE
C.P. 515 — 12201 — São José dos Campos, SP, Brasil

The equatorial F region plasma zonal drift ($V_{i\phi}$) and the thermospheric zonal wind (U_{ϕ}) are simulated using the numerical model described by Batista (1986). The simulated $V_{i\phi}$ diurnal variations are in good agreement with the Jicamarca radar measurements. The simulation results show that the nocturnal peak in $V_{i\phi}$ undergoes the influence of the local magnetic declination, in the same way that was already observed for the evening F-region plasma vertical drift pre-reversal enhancement (Batista & Abdu, 1985). Another observed feature is concerned with the vertical $V_{i\phi}$ profiles that show, in the evening hours, negative drifts (westward) at lower heights and positive drifts (eastward) at higher heights. All these results, as well as the simulated thermospheric zonal wind, are discussed and compared with other models and measurements showing good agreement.

INTRODUÇÃO

O mecanismo do dínamo da região F, o qual dá origem a correntes e campos elétricos de polarização, foi proposto por Rishbeth (1971 a,b) e modelado por Heelis et al. (1974). Os ventos termosféricos, geradores do dínamo, são originados pelos gradientes de pressão existentes na termosfera devidos ao aquecimento solar. Estes ventos induzem movimentos às partículas carregadas da região F da ionosfera. O movimento gerado na direção perpendicular tanto ao campo magnético quanto ao vento termosférico dá origem a uma corrente elétrica que tende a estabelecer um campo de polarização. Porém, pelo fato de os elétrons terem muita mobilidade ao longo das linhas de campo magnético, as quais se comportam como bons condutores, este campo elétrico de polarização pode ser descarregado por correntes que fluem ao longo das linhas de campo magnético e através da região E. Assim, durante o dia, quando a condutividade da região E (perpendicular às linhas de campo magnético) é alta, fecha-se um circuito de corrente entre as regiões E e F, via linhas de campo magnético. Nestas horas as derivas da região F equatorial são representativas dos ventos netos da região E, os quais geram os campos elétricos que são mapeados na região F. Porém, à noite, quando a condutividade da região E é muito baixa, o circuito não se fecha, o que dá origem a campos elétricos de polarização na região F e resulta em um movimento zonal do plasma aproximadamente à mesma velocidade das partículas neutras (Rishbeth, 1971a; Woodman, 1972; Heelis et al., 1974).

Batista (1986) desenvolveu um modelo numérico semelhante ao de Heelis et al. (1974), o qual simula o acoplamento eletrodinâmico das regiões E e F. O parâmetro de

acoplamento entre as duas regiões é a corrente paralela à linha de campo na base da região F, $J_{||}$, a qual, por ser inicialmente desconhecida, é considerada nula (porém, o resultado final não é alterado pela escolha de $j_{||}$ inicial). O potencial eletrostático da região E, o qual é gerado pela componente diurna dos ventos de marés, é calculado numericamente mediante a solução de uma equação diferencial parcial elíptica. Este potencial é usado para calcular os campos elétricos de polarização da região E, os quais são mapeados através das linhas de campo magnético para a região F, onde afetam as correntes e derivas do plasma. A componente zonal do vento termosférico na região F é calculada mediante a solução de uma equação diferencial parcial parabólica, não-linear. A seguir são calculadas as derivas e as correntes na região F, as quais são usadas para encontrar a corrente alinhada ao campo magnético mediante uma integração numérica ao longo da linha de campo. Este novo valor de $j_{||}$ é usado para realimentar a equação do potencial eletrostático, e o processo todo é repetido até que se chegue a uma condição de regime permanente. Os detalhes do método numérico e dos parâmetros atmosféricos usados nos cálculos são descritos por Batista (1986).

Este trabalho mostra os resultados da simulação obtidos para a deriva zonal do plasma da região F equatorial ($V_{i\phi}$) e para a componente zonal do vento termosférico (U_{ϕ}), procurando comparar, sempre que possível, os resultados simulados com aqueles observados mediante o uso de diferentes técnicas de medidas. As simulações são feitas para duas localidades diferentes, Fortaleza (Brasil) e Huancayo (Perú), e para três meses representativos das três estações do ano. As coordenadas

geográficas e magnéticas de Fortaleza, Huancayo e Jicamarca (Perú) estão mostradas na Tabela 1. Os parâmetros supostos conhecidos e utilizados como dados de entrada do modelo foram a densidade do oxigênio atômico, a temperatura exosférica, as densidades eletrônicas no pico das camadas E e F, a variação diurna da altura do pico da camada F, a frequência de colisão dos íons com as partículas neutras e o coeficiente de viscosidade molecular. As densidades eletrônicas nos picos das camadas E e F foram obtidas a partir dos ionogramas de Fortaleza e Huancayo (Batista, 1986). A densidade do oxigênio atômico foi obtida do modelo de atmosfera neutra de Jacchia (1977). Todos os demais parâmetros foram os mesmos utilizados por Heelis et al. (1974). O modelo que usou os parâmetros de entrada acima descritos, denominado M2, foi utilizado para obter os resultados que serão apresentados a seguir.

Tabela 1 – Coordenadas geográficas, inclinação e declinação magnética de Fortaleza, Huancayo e Jicamarca.

| | Geográficas | | Magnéticas | |
|-----------|-------------|-----------|------------|------------|
| | Latitude | Longitude | Inclinação | Declinação |
| Fortaleza | - 3,3° | - 38,0° | - 2,0° | - 21° |
| Huancayo | - 12,0° | - 75,3° | 0,6° | 3° |
| Jicamarca | - 12,0° | - 77,0° | 0,9° | 3° |

A DERIVA ELETROMAGNÉTICA ZONAL

A deriva zonal da região F equatorial é produzida pelo campo elétrico vertical na presença do campo magnético dirigido para norte. Nas figs. 1 e 2 são mostradas as variações diurnas de $V_{i\phi}$, na altura de 350 km, para Fortaleza e Huancayo nos meses de dezembro de 1978, março e junho de 1979, obtidas usando o modelo M2 descrito anteriormente. Os valores positivos de $V_{i\phi}$ indicam deriva para leste. Deste modo o comportamento médio da deriva zonal é caracterizado por velocidades dirigidas para oeste durante o dia e para leste à noite, com horários de inversão em torno de 06:00 e 18:00 horas. Este comportamento médio está de acordo com o observado usando o radar de Jicamarca (Fejer et al., 1981).

Durante o dia a deriva zonal da região F equatorial depende principalmente dos ventos termosféricos da região E, os quais geram os campos elétricos da região F. Logo, já era esperado que a simulação fornecesse derivas diurnas idênticas em Fortaleza e Huancayo, em todos os meses, pois o modelo dos ventos de marés permaneceu fixo em todos os cálculos.

À noite, a deriva zonal sofre influência principalmente dos campos elétricos de polarização da região F; portanto é influenciada mais diretamente pelos ventos termosféricos que geram estes campos. O comportamento noturno da deriva zonal obtido pelo modelo é caracterizado por um acentuado máximo entre 21:00 e 23:00 horas, cuja amplitude varia entre 130 ms^{-1} e 260 ms^{-1} para os diversos modelos de vento termosférico simulados. Estes valores estão, em geral, mais altos do que

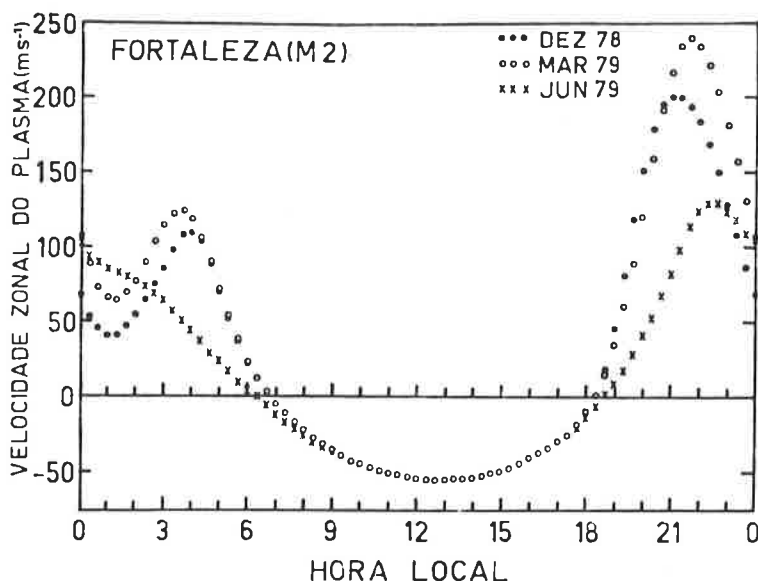


Figura 1 - Variação diurna da velocidade de deriva zonal do plasma da região F a 350 km de altura sobre Fortaleza, obtida usando o modelo M2 para os meses de dezembro de 1978 (. . .), março de 1979 (o o o) e junho de 1979 (x x x).

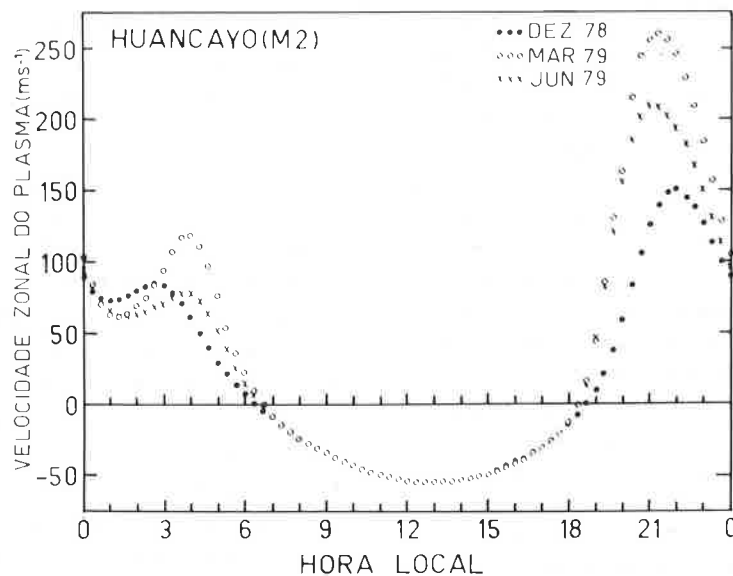


Figura 2 - Variação diurna da velocidade e deriva zonal do plasma da região F a 350 km de altura sobre Huancayo, obtida usando o modelo M2 para os meses de dezembro de 1978 (. . .), março de 1979 (o o o) e junho de 1979 (x x x).

os medidos pelo radar de Jicamarca, que são da ordem de 100 - 130 ms^{-1} , por volta de 21:00 horas (Fejer et al., 1981). Porém, Abdu et al. (1984, 1985a,b) inferiram derivas zonais do plasma ionosférico da região F equatorial, da ordem de 250 ms^{-1} , a partir de dados obtidos usando polarímetros espaçados ao longo de um mesmo paralelo magnético. Uma outra característica da deriva noturna que resultou da simulação é a presença de um pico pré-reversão em $V_{i\phi}$ por volta de 04:00 horas, o qual está presente em quase todos os meses simulados (só não aparece em junho para Fortaleza). Este comportamento é consequência do efeito dos campos de polarização da região F, os quais acarretam o mesmo tipo de variação no vento termosférico, como será visto posteriormente. Esta mesma tendência em formar um pico pré-reversão ao amanhecer é observada nos dados de deriva zonal obtidos usando o radar de Jicamarca (Fejer et al., 1981) e nos dados de Thumbā, Índia, obtidos usando o método de receptores espaçados (Rastogi et al., 1972), ambos para aproximadamente a mesma época do ciclo solar.

Nas Figs. 1 e 2 observa-se uma variação sazonal no horário de ocorrência do pico noturno da deriva zonal. Em Fortaleza (Fig.1) o pico noturno em $V_{i\phi}$ ocorre mais cedo em dezembro e mais tarde em junho. No entanto, o pico pré-reversão em $V_{i\phi}$ que ocorre ao amanhecer em Fortaleza, mostra um comportamento oposto, ou seja, ocorre mais tarde em dezembro que nos outros meses. Em Huancayo (Fig. 2) o comportamento sazonal é tal que o pico noturno em $V_{i\phi}$ ocorre mais cedo em junho e mais tarde em dezembro, porém o pico pré-reversão em $V_{i\phi}$ ocorre mais cedo em dezembro e mais tarde em junho. Este comportamento sazonal do horário do pico noturno em $V_{i\phi}$ é semelhante ao observado no pico pré-reversão

da deriva vertical (Batista, 1986; Batista & Abdu, 1985) e é consequência dos diferentes modelos de condutividade da região E usados para os três meses modelados. Estes diferentes modelos de condutividade levam em consideração a assimetria em relação ao equador magnético, introduzida pela declinação magnética em cada localidade. Nos modelos usados para Fortaleza a condutividade da região E atinge seu valor noturno (o qual é considerado constante) mais cedo em dezembro e, por simetria, o aumento da condutividade ao amanhecer inicia mais tarde nestes meses. Em junho este comportamento é invertido. É este comportamento da condutividade que provoca a variação sazonal observada tanto no pico noturno como no pico pré-reversão da deriva zonal. Ao entardecer, quanto mais tarde a variação longitudinal da condutividade tornar-se nula (junho em Fortaleza e dezembro em Huancayo), mais tarde ocorrerá o pico noturno em $V_{i\phi}$. Ao amanhecer, quanto mais cedo iniciar a variação longitudinal de condutividade, mais cedo também ocorrerá o pico pré-reversão em $V_{i\phi}$.

A Fig. 3 mostra perfis verticais da deriva zonal do plasma ionosférico calculados usando o modelo M2 para Fortaleza em dezembro de 1978. As várias curvas representam horários diferentes. Estes perfis são semelhantes aos apresentados por Heelis et al. (1974). Entre 19:00 horas e meia-noite $V_{i\phi}$ varia muito com a altura. Nos outros horários a variação é bem menor e chega a ser quase nula em alguns horários. Nas primeiras horas da noite (19:00 - 20:00 horas) a simulação fornece perfis verticais da deriva zonal os quais mostram derivas negativas (para oeste) abaixo de aproximadamente 200 km de altura e derivas positivas (para leste) em alturas maiores, o que mostra a existência de um cisalhamento em $V_{i\phi}$.

nestes horários, por volta de 200 km. A existência de fortes cisalhamentos nas derivas leste-oeste da região F, ao anoitecer, foi sugerida por Valenzuela et al. (1980) através da análise de medidas feitas por foguetes. Eles observam que, ao anoitecer, a ionosfera nas alturas abaixo o pico da camada F ainda sofria derivas para oeste, enquanto acima destas alturas a deriva já havia se invertido para leste há várias horas (o horário médio da inversão de oeste para leste observado para Jicamarca está entre 16:00 e 17:00 horas). Posteriormente Kudeki et al. (1981) e Fejer et al. (1984), usando resultados de interferômetro para a região F em Jicamarca, e Tsunoda et al. (1981), usando resultados obtidos pelo radar ALTAIR, obtiveram também indicações da existência de tais cisalhamentos. Os resultados da simulação concordam com as observações no horário da ocorrência do cisalhamento; porém, a altura da inversão da velocidade é observada em torno do pico da camada F e a simulação mostrou valores bem mais baixos. Talvez esta discrepância possa ser atribuída à variação longitudinal adotada para a altura do pico da camada F ao anoitecer, ou seja, um decréscimo suave de 350 km até 300 km, o que foge do comportamento real da altura do pico nestes horários.

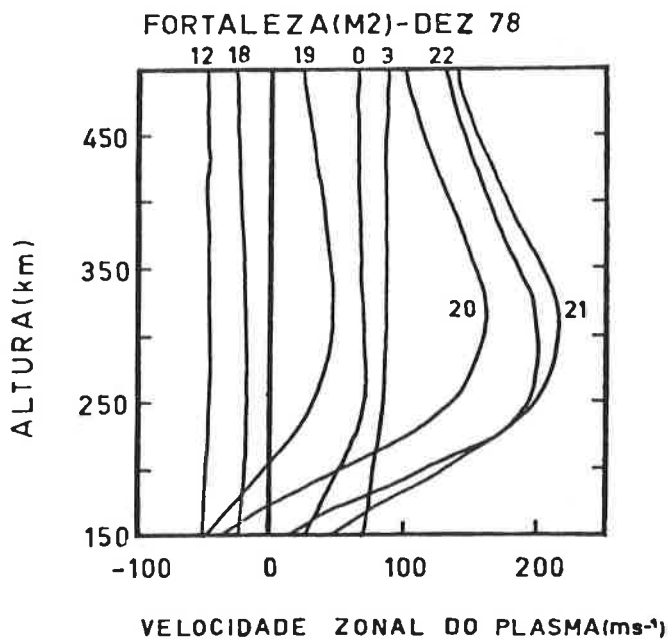


Figura 3 - Perfis verticais da deriva zonal do plasma da região F sobre Fortaleza, obtidos usando o modelo M2 para dezembro de 1978, para várias horas locais, as quais estão identificando cada curva.

O VENTO TERMOFÉRICO ZONAL

As forças consideradas no cálculo do vento são a do gradiente de pressão, a do arraste iônico e a viscosa. O vento termosférico é obtido resolvendo a equação do

movimento da atmosfera neutra nas alturas da região F. É a ação deste vento que, ao soprar perpendicularmente às linhas de campo magnético, dá origem às correntes de dínamo da região F.

As Figs. 4 e 5 mostram a variação diurna da componente zonal do vento neutro, calculada a 350 km de altura, usando o modelo M2 para Fortaleza e Huancaayo, para os meses de dezembro de 1978, março e junho de 1979. O vento calculado é negativo (para oeste) durante o dia e positivo (para leste) à noite, com horários de inversão por volta de 06:00 e 18:00 horas. O valor máximo de U_ϕ durante o dia varia entre 60 e 90 ms^{-1} para os vários casos modelados. À noite, porém, observa-se uma variação do pico desde 170 ms^{-1} até 280 ms^{-1} nos horários entre 21:00 e 23:00 horas. Estes valores estão de acordo com os obtidos por Bittencourt et al. (1976) para a velocidade zonal do vento termosférico inferida a partir de dados das emissões OI 1356 Å e OI 6300 Å. Eles obtiveram vento zonal com um máximo de 260 ms^{-1} por volta de 22:00 horas. Sipler et al. (1983) mediram ventos termosféricos em latitudes equatoriais usando um interferômetro Fabry-Perot e obtiveram ventos para leste com velocidades maiores que 300 ms^{-1} em torno de 23:00 horas, embora valores máximos menores que 200 ms^{-1} tenham sido observados com mais frequência.

A Fig. 6 mostra uma comparação entre o vento termosférico zonal calculado a 350 km de altura, usando o modelo M2 para Fortaleza (linha contínua), e o medido pelo satélite Dynamics Explorer 2 entre $\pm 10^\circ$ de latitude em torno do equador, no período compreendido entre julho de 1981 e fevereiro de 1983 (pontos), conforme Wharton et al. (1984). O satélite mede velocidades entre 200 e 700 km de altitude, porém a maioria dos dados foram obtidos entre 300 e 400 km de altitude. Pode-se observar que há uma boa concordância entre o vento simulado e os valores medidos. Os horários de inversão e do pico noturno ocorrem um pouco mais tarde na simulação que nas observações. Porém, é importante salientar que a tendência em formar um pico pré-reversão em U_ϕ antes do amanhecer, vista nos dados experimentais, é bem simulada pelo modelo. Modelos teóricos que não levam em consideração o dínamo da região F (Máyr et al., 1979) não simulam este pico, o qual só aparece como consequência do efeito dos campos de polarização da região F.

Através da análise de órbitas de satélites artificiais King-Hele (1972) deduziu que, em latitudes equatoriais, entre 150 e 300 km de altura, há um vento dominante que sopra para leste. As velocidades médias variam desde 0, a 150 km, até 120 m^{-1} , a 350 km (King-Hele & Walker, 1977), o que sugere que a atmosfera esteja girando até 1,3 vezes mais rapidamente do que a Terra. Wo-

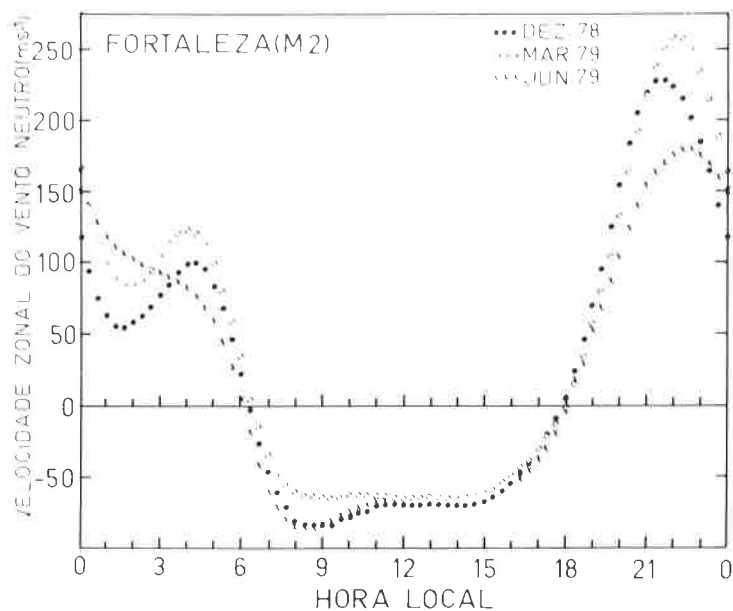


Figura 4 - Variação diurna da componente zonal do vento neutro termosférico a 350 km sobre Fortaleza, obtida usando o modelo M2 para dezembro de 1978 (•••), março de 1979 (o o o) e junho de 1979 (x x x).

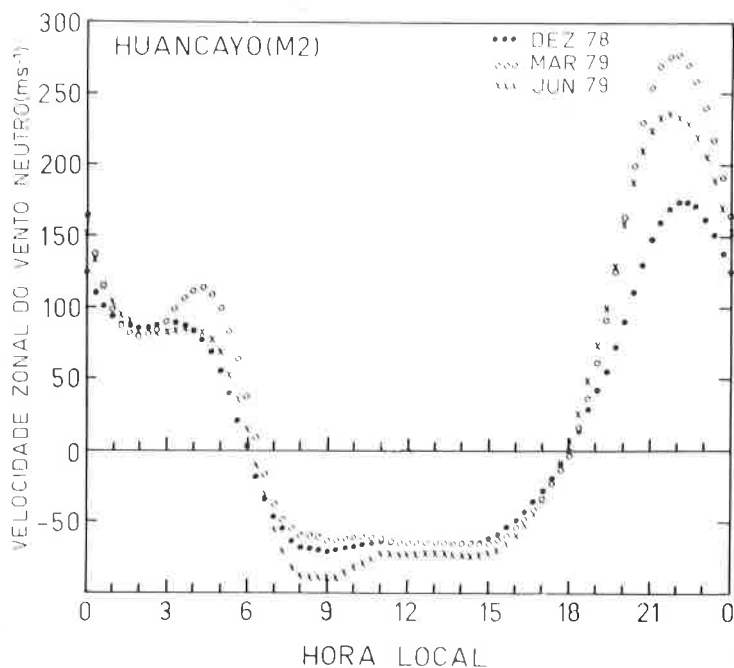


Figura 5 - Variação diurna da componente zonal do vento neutro termosférico a 350 km sobre Huancayo, obtida usando o modelo M2 para dezembro de 1978 (•••), março de 1979 (o o o) e junho de 1979 (x x x).

odman (1972) também inferiu super-rotação atmosférica usando os dados obtidos com o radar de Jicamarca e Heelis et al. (1974) obtiveram um fator de super-rotação de 1,11 na altura de 240 km. Wharton et al. (1984), usando dados de satélites, obtiveram fatores de super-rotação da

ordem de 1,05 nas regiões equatoriais entre 300 e 400 km de altura. No presente trabalho os fatores de super-rotação calculados para a altura de 350 km variam entre 1,05 e 1,1. Estes valores se aproximam mais dos de Wharton et al. (1984) que dos de King-Hele & Walker (1977).

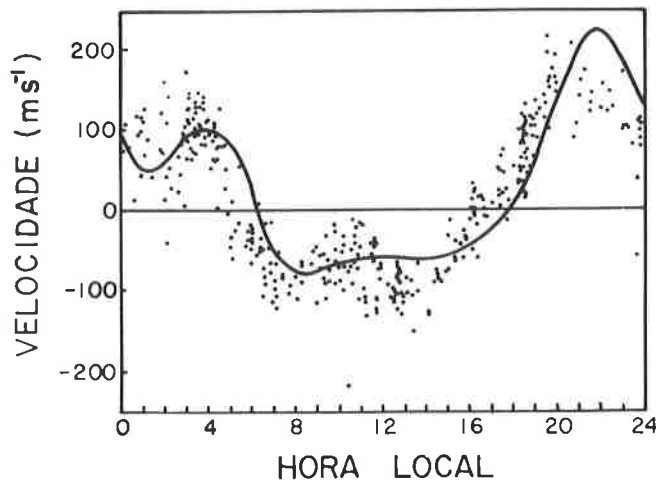


Figura 6 - Velocidade zonal do vento termosférico a 350 km de altura sobre o equador, simulada pelo presente modelo (linha contínua) e medida pelo satélite Dynamics Explorer 2 entre $\pm 10^\circ$ de latitude em torno do equador (pontos), de acordo com Wharton et al. (1984).

DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

O modelo numérico descrito em Batista (1986) foi usado para simular a deriva zonal do plasma da região F equatorial e a componente zonal do vento termosférico. Tal modelo leva em consideração o dínamo da região F e os campos elétricos de polarização aí desenvolvidos após o pôr do Sol, quando a condutividade da região E decresce significativamente e não é mais suficiente para curto-circuitar as correntes que fluem paralelamente às linhas de campo magnético. Os resultados da simulação obtidos para a deriva zonal do plasma da região F equatorial mostraram um padrão de variação diurna que concorda bem com as medidas feitas pelo radar de Jicamarca. Observou-se que o horário de ocorrência do pico noturno em $V_{i\phi}$ segue a mesma variação sazonal do pico pré-reversão da deriva vertical (Batista & Abdu, 1985), o que mostra que a declinação magnética influencia também a deriva zonal do plasma da região F equatorial. O cisalhamento observado experimentalmente nos perfis verticais de $V_{i\phi}$ nas primeiras horas da noite, também é simulado pelo modelo, da mesma forma que pelo modelo

de Heelis et al. (1974). O padrão de variação diurna da altura do pico da camada F, usado como parâmetro de entrada no modelo, é um ponto que deve ser melhorado, principalmente próximo ao pôr do Sol quando a camada sobe bastante. Isso deve melhorar a altura simulada do cisalhamento em $V_{i\phi}$, a qual não concorda com as observações.

O vento termosférico zonal simulado pelo presente modelo concorda muito bem com os resultados medidos por satélites em latitudes equatoriais (Wharton et al., 1984). A inclusão dos campos elétricos de polarização da região F é essencial para simular o pico pré-reversão observado experimentalmente em U_ϕ ao amanhecer. Observaram-se ainda variações do vento termosférico zonal com a localidade e com a estação do ano.

Dessa forma o modelo mostrou-se conveniente para simular tanto as derivas do plasma da região F equatorial quanto a componente zonal do vento termosférico, sendo inclusive mais eficaz neste caso que aqueles que não incluem os campos elétricos de polarização da região F.

REFERÊNCIAS

- ABDU, M.A., BATISTA, I.S., PAULA, E.R. SOBRAL, J.H.A. & KANTOR, I.J. - 1984 - Observações de bolhas de plasma e de sua deriva zonal usando polarímetros. São José dos Campos, INPE-3219-PRE/572.
- ABDU, M.A., BATISTA, I.S., SOBRAL, J.H.A., PAULA, E.R. & KANTOR, I.J. - 1985a - Equatorial ionospheric plasma

bubble irregularity occurrence and zonal velocities under quiet and disturbed conditions, from polarimeter observations. *J. Geophys. Res.*, **90**: 9921-9928.

- ABDU, M.A., KANTOR, I.J., BATISTA, I.S. & PAULA, E.R. - 1985b - East-West plasma bubble irregularity motion determined from spaced VHF polarimeters: implications on

- velocity shear in the zonal F-region bulk plasma motion. *Radio Sci.*, **20** : 111-122.
- BATISTA, I.S. - 1986 - Dínamo da região F equatorial: Assimetrias sazonais e longitudinais no setor americano. Tese de Doutorado INPE, São José dos Campos, SP.
- BATISTA, I.S. & ABDU, M.A. - 1985 - Assimetrias sazonais e longitudinais na deriva vertical da camada F em Fortaleza e Huancayo. São José dos Campos, INPE, 20 PP.
- BITTENCOURT, J.A., TINSLEY, B.A., HICKS, G.T. & REED, E.I. - 1976 - Tropical F region winds, from OI 1356 Å and OI 6200 Å emissions. A. Analysis of Ogo 4 data. *J. Geophys. Res.*, **81** : 3786-3790.
- FEJER, B.-B., FARLEY, D.T., GONZALEZ, C.A., WOODMAN, R.F. & CALDERON, C. - 1981 - F region east-west drifts at Jicamarca. *J. Geophys. Res.*, **86** : 215-218.
- FEJER, B.G., KUDEKI, E. FARLEY, D.T. & LAGOS, P. - 1984 - Equatorial F region east-west drifts during solar maximum. *EOS Trans. Amer. Geophys. Union* **65** : 1025.
- HEELIS, R.A., KENDALL, P.C., MOFFETT, R.J., WINDLE, D.W. & RISHBETH, H. - 1974 - Electrical coupling of the E and F region and its effects on F region drifts and winds. *Planet. Space Sci.*, **22** : 743-756.
- JACCHIA, L.G. - 1977 - Thermospheric temperature, density, and composition: new models. *Smithsonian Astrophys. Obs. Spec. Rep.* nº 375.
- KING-HELE, D.G. - 1972 - Measurements of upper-atmosphere rotational speed from changes in satellite orbits. *Space Research*, **12** : 847-855.
- KING-HELE, D.G. & WALKER, D.M.C. - 1977 - Upper atmosphere zonal winds: variation with height and local time. *Planet. Space Sci.*, **25** : 313-336.
- KUDEKI, E., FEJER, B.G., FARLEY, D.T. & IERKIK, H.M. - 1981 - Interferometers studies of equatorial F region irregularities and drifts. *Geophys. Res. Lett.*, **8** : 377-380.
- MAYR, H.G., HARRIS, I., SPENCER, N.W., HEDIN, A.E., WHARTON, L.E., PORTER, H.S., WALKER, J.C.G. & CARLSON, H.C. - 1979 - Tides and the midnight temperature anomaly in the thermosphere. *Geophys. Res. Lett.*, **6** : 447-450.
- RASTOGI, R.G., CHANDRA, H. & MITRA, R.K. - 1972 - Feature of the ionospheric drift over the magnetic equator. *Space Research*, **12** : 983-992.
- RISHBETH, H. - 1971a - The F layer dynamo. *Planet. Space Sci.*, **19** : 263-267.
- RISHBETH, H. - 1971b - Polarization fields produced by winds in the equatorial F-region. *Planet. Space Sci.*, **19** : 357-369.
- SIPLER, D.P., BIONDE, M.A. & ROBLE, R.G. - 1983 - F-region neutral winds and temperatures at equatorial latitudes: measured and predicted behaviour during geomagnetically quiet conditions. *Planet. Space Sci.*, **31** : 53-66.
- TSUNODA, R.T., LIVINGSTON, R.C. & RINO, C.L. - 1981 - Evidence of a velocity shear in bulk plasma motion associated with the post-sunset rise of the equatorial F-Layer. *Geophys. Res. Lett.*, **8** : 807-810.
- VALENZUELA, A., HAERENDEL, G., FOPPL, A., REIGER, E., FEJER, B.G. & KELLEY, M.C. - 1980 - Incoherent scatter radar and barium cloud measurements of electric fields in the equatorial zone. *EOS Trans. Amer. Geophys. Union*, **61** : 315.
- WHARTON, L.E., SPENCER, N.W. & MAYR, H.G. - 1984 - The earth's thermospheric superrotation from Dynamics Explorer 2. *Geophys. Res. Lett.*, **11** : 531-533.
- WOODMAN, R.F. - 1972 - East-west ionospheric drifts at the magnetic equator. *Space Research*, **12** : 969-974.