



Efeitos das Tempestades Magnéticas na Ionosfera de Baixa Latitude

C. S. Yamashita; J. H. A. Sobral e M. A. Abdu

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, Brasil

RESUMO

As tempestades magnéticas e os seus efeitos na ionosfera terrestre constituem atualmente um dos temas de maior interesse da comunidade científica especializada no campo de estudos da climatologia espacial cujo conteúdo versa sobre o estudo integrado do sistema ionosfera/termosfera/magnetosfera/meio interplanetário. As tempestades magnéticas são caracterizadas basicamente por fortes depleções na variação temporal do parâmetro geomagnético Dst e também por valores elevados do índice Kp. Durante a ocorrência delas, a ionosfera sofre perturbações em nível global. O objetivo deste estudo é analisar em detalhe os efeitos de uma grande tempestade magnética na ionosfera sobre a região de Fortaleza. Os principais efeitos ionosféricos a serem aqui investigados são os seguintes: 1) Penetração de campos elétricos zonais (direção leste-oeste) na região de baixa e média latitude; 2) Efeitos dos ventos termosféricos perturbados (*Disturbance Dynamo*). A metodologia a ser empregada para o estudo dos efeitos ionosféricos das tempestades magnéticas consiste basicamente na comparação dos parâmetros ionosféricos dos dias magneticamente perturbados com o valor médio dos mesmos parâmetros dos dias magneticamente quietos.

INTRODUÇÃO

Durante os últimos anos tem sido intenso o esforço da Divisão de Aeronomia do INPE (DAE) para se estudar as perturbações da ionosfera sobre a região brasileira. As irregularidades ionosféricas que tanto afetam as radio comunicações, foram estudadas em detalhe (Abdu et al., 1988, 1990; Sobral et al., 1997; Fejer et al., 1990). As tempestades magnéticas também foram muito estudadas por pesquisadores da Divisão de Aeronomia DAE do INPE e continuam a ser estudadas (Abdu et al., 1988, 1990, 1995, 1996a, b, c; Sobral et al., 1997). A modelagem computadorizada dos efeitos ionosféricos das tempestades magnéticas também tem sido estudados pela DAE em colaboração internacional. O estudo dos efeitos ionosféricos das tempestades magnéticas sobre a ionosfera na região de baixa latitude magnética é de grande interesse para os grupos de pesquisa que trabalham nessa área no Brasil, uma vez que todo o território brasileiro está confinado na região de baixa latitude magnética. As ionosondas são equipamentos apropriados para tais estudos, pois podem funcionar ininterruptamente durante longos períodos, produzindo longas séries temporais de dados contínuos. Um dos efeitos ionosféricos a ser estudado são os ventos termosféricos perturbados que na região F da ionosfera empurram o plasma ao longo das linhas de força do campo geomagnético. O plasma ionosférico também sofre derivas verticais e horizontais sob a ação de campos elétricos perturbados. Os ventos termosféricos não perturbados se originam do gradiente de pressão gerado pelo aquecimento solar. O efeito dos ventos sobre a ionosfera podem ser bastante distintos dependendo da declinação e inclinação (dip) do campo geomagnético. Um exemplo típico da influência dos ventos termosféricos na dinâmica da ionosfera é a geração do fenômeno spread-F tipo range que ocorre após o pôr do sol, com a subida da camada F. O spread-F a que nos referimos, está relacionado com as depleções ionosféricas equatoriais, ou bolhas ionosféricas, ele pode ser inibido ou amplificado com a ação dos ventos.

A IONOSFERA TERRESTRE

A ionosfera é a parte da atmosfera onde a concentração de elétrons e íons livres é apreciável a ponto de influenciar a propagação das ondas de rádio. Normalmente se divide a ionosfera em três regiões, chamadas D, E, e F. 1) Região D – região entre 75 km a 95 km de altura. Essa região é responsável pela absorção das ondas de rádio em alta frequência que são refletidas nas camadas superiores; 2) Região E – região entre 95 km a 150 km de altura que abriga a região dínamo, ou seja, a região que tipicamente gera campos e correntes elétricas decorrentes da ação dos ventos neutros sobre o plasma ionosférico, na presença do campo magnético terrestre; 3) Região F – região acima de 150 km onde se concentram as camadas refletoras mais importantes, a camada F2 normalmente encontrada e a camada F1 encontrada nas regiões temperadas.

TEORIA DOS EFEITOS DAS TEMPESTADES MAGNÉTICAS

As tempestades magnéticas são definidas como bruscas diminuições de intensidade na curva Dst cujo fenômeno é causado por correntes elétricas que circulam no sentido leste-oeste, no cinturão de radiação de Van Allen. As tempestades magnéticas podem afetar a ionosfera terrestre ao longo de todo o globo terrestre. Elas podem aumentar ou diminuir a ionização e fazer a ionosfera subir e baixar de altura. Esses efeitos podem ser causados por campos elétricos ou ventos neutros, isto é, ventos horizontais da atmosfera eletricamente neutra. A termosfera é a atmosfera neutra que

convive com a ionosfera. Quase não existem ventos neutros verticais. Tanto os ventos neutros como os campos elétricos perturbados gerados durante as tempestades magnéticas causam dois efeitos na ionosfera: subida e descida de altura. A seguir descreveremos os mecanismos através dos quais os ventos e campos elétricos afetam a altura da ionosfera.

Durante as tempestades magnéticas, partículas energéticas provenientes do vento solar e da cauda da magnetosfera se precipitam na região auroral intensificando as correntes elétricas aurorais que fluem ao longo do chamado círculo auroral, que fica localizado aproximadamente em torno da latitude de 60° . A corrente auroral circula numa altura de aproximadamente 110 km (região E da ionosfera). Estas correntes elétricas aquecem a atmosfera de altas latitudes por efeito Joule resultando nos ventos termosféricos perturbados que se dirigem ao equador. Outro parâmetro geomagnético muito importante que temos que ter em mente quando analisamos os efeitos ionosféricos é a polaridade da componente norte-sul do campo magnético interplanetário, Bz. Quando Bz se torna negativo, ou seja, quando se aponta na direção sul, ocorre um forte acoplamento de energia entre o meio interplanetário e a magnetosfera terrestre. Nesse momento o índice AE apresenta fortes perturbações devido às correntes aurorais intensas que se formam a partir desse instante. Por outro lado, quando Bz se torna positivo, ocorre o contrário, ou seja, diminui o acoplamento do meio interplanetário com a magnetosfera. Portanto, resumindo o que foi dito acima, temos: 1) Bz se torna negativo: existe forte transferência de energia do meio interplanetário para a região auroral, resultando fortes correntes elétricas na região E equatorial; 2) Bz se torna positivo: reduz-se a transferência de energia entre o meio interplanetário e a magnetosfera. Por outro lado o índice Dst é muito importante também. Ele representa a variação média da componente horizontal H do campo geomagnético em nível de solo, durante as tempestades magnéticas.

INSTRUMENTAÇÃO

Neste trabalho foram utilizados dados da ionossonda do INPE instalada em Fortaleza e dados do satélite científico ISEE3 (dados de Bz), índices AE e Dst.

A ionossonda é um sondador que mede o perfil de densidade eletrônica da ionosfera e os ionogramas são os registros produzidos pelas ionossondas que mostram a variação da altura virtual de reflexão da onda de rádio em função da frequência da onda. Na Figura 1 pode ser visto um exemplo de um ionograma. Essa altura medida é dita virtual devido ao fato do sondador medir o tempo decorrido entre a transmissão de um pulso, considerando que ele se propagou a velocidade da luz, e a recepção do mesmo pulso após haver reflexão na ionosfera, e considera esse tempo como proporcional a altura onde se deu a reflexão. O pulso recebido é chamado eco. A altura real, onde a reflexão realmente aconteceu é sempre menor que a altura virtual devido ao retardo sofrido pelo sinal eletromagnético pela ionização existente abaixo do ponto de reflexão. Quando a frequência da onda aumenta, a altura virtual mostrada no ionograma também aumenta. Quando a reflexão alcança a altura onde o conteúdo eletrônico é máximo, a onda incidente fura a camada não havendo portanto retorno do pulso incidente e o sondador mede a altura virtual como infinita. Essa frequência é chamada frequência crítica. Outro ponto que deve ser esclarecido é a possibilidade de múltiplas reflexões entre a ionosfera e a terra. Um ionograma contém uma grande quantidade de informações que seria impraticável a interpretação e tabulação de todos os valores.

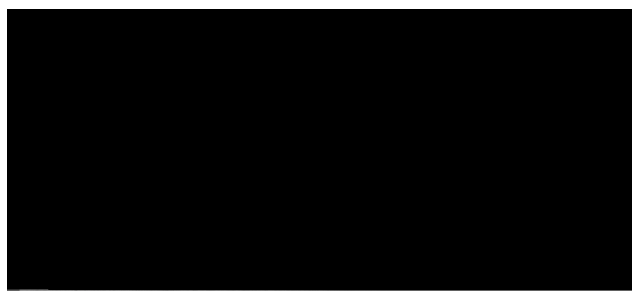


Figura 1: Ionograma da estação de Cachoeira Paulista do dia 9/11/78 às 7:00h

METODOLOGIA

Como foi dito acima as tempestades magnéticas consistem em fortes variações do campo geomagnético, e podem ser detectadas em nível de solo por instrumentos denominados magnetômetros. Durante tais tempestades o índice geomagnético Kp aumenta de valor. O índice geomagnético Kp é um número proporcional ao grau de perturbação do campo magnético terrestre. O índice Kp é periodicamente obtido por alguns observatórios espaciais internacionais. Os índices Kp aqui utilizados foram obtidos da revista intitulada "Journal of Geophysical Research", publicado mensalmente pela União Geofísica Norte-americana. Os dias aqui estudados são dias em que ocorreram fortes tempestades magnéticas e portanto apresentam altos índices Kp. O estudo dos efeitos ionosféricos das tempestades magnéticas é em geral feito em comparação com os dias magneticamente quietos (valores baixos de Kp). A média dos dias quietos informa sobre o comportamento quieto da ionosfera. Uma superposição do dia perturbado (o dia em que o valor de Kp é relativamente mais elevado) que está sendo estudado com a média dos dias quietos muitas vezes permite visualizar claramente as perturbações sofridas pela ionosfera. Serão selecionados os dias quietos próximos do dia do evento perturbado que se quer estudar, a fim de evitar o mascaramento por efeitos sazonais sobre os parâmetros a serem estudados. Dessa forma, para calcular a média dos dias quietos serão selecionados os dias mais quietos no período de 30 dias em torno do dia do evento perturbado.

RESULTADOS OBTIDOS

A Figura 2 apresenta os resultados obtidos dos parâmetros ionosféricos e parâmetros geomagnéticos acima discutidos,

para o período de 5 a 8 de setembro de 1982.

Efeitos observados no período de 5-8/9/1982

Os pontos representam o dia perturbado e os perfis contínuos representam a média dos dias quietos citados na parte inferior esquerda do gráfico. A tempestade magnética pode ser caracterizada por 3 fases: início súbito (*sudden commencement*), caracterizado por um aumento do campo magnético; fase principal, que é o intervalo de alto decréscimo de intensidade do índice Dst; e fase de recuperação, quando a intensidade desse índice tende a restaurar sua intensidade normal.

O índice AE apresenta uma grande intensidade nos três primeiros dias, decaindo no final do terceiro dia e recuperando a normalidade no quarto dia (dia 8). Portanto espera-se um forte efeito de perturbação dínamo (*Disturbance Dynamo*) nos três primeiros dias.

Fase Principal da Tempestade (Main Phase) – 5/9/1982 20HL (Hora Local) a 6/9/1982 08HL

Às 20HL do dia 5 a altura virtual sofre um grande aumento logo após o início do *pre-reversal enhancement*. Nesse momento vemos uma forte queda de Bz para sul, o que indica que a subida da camada estava relacionada à uma penetração de campo elétrico. Cerca de uma hora depois h'F começa a perder altura, seguindo o padrão de comportamento logo após a reversão. Às 22HL do dia 5 a camada ionosférica começa a subir de novo. Infelizmente não temos dados de Bz nesse momento para verificar a penetração de campo elétrico como no caso anterior. Às 23HL do dia 5 a camada volta a descer conforme o seu movimento habitual.

À 01HL do dia 6 h'F sofre um fortíssimo aumento que perdura por cerca de 4 horas e às 05HL do dia 6 volta a sofrer forte queda. Por volta da 01HL desse dia acontece uma forte inversão de Bz para a direção sul, simultaneamente com o início da tempestade magnética possivelmente associada à uma penetração de campos elétricos no início da tempestade. Por outro lado, uma queda de intensidade do índice AE (decréscimo de convecção) é observada à 01HL do dia 06. O modelo de Spiro et al. (1988) prevê aumentos na altura da camada por efeitos de penetração de campos elétricos para o no momento de diminuição da convecção auroral. Fejer (1991) cita que os campos de penetração mais fortes ocorrem durante as diminuições de convecção na região auroral causados pelo desvio de Bz para norte. O índice AE de fato baixou de intensidade à 01HL do dia 6 o que pode ter concorrido para o evento da penetração de um campo para leste. Outra queda forte do índice AE ocorreu às 04HL do dia 6 simultaneamente com uma fortíssima subida da camada F que foi claramente detectada tanto pela curva h'F como a h'F₃.

Recuperação (Recovery Phase) – De 6/9/1982 08HL em diante

Das 06HL do dia 6 às 12HL do dia 6 houve uma subida substancial do plasma revelado pelo perfil de h'F. Pela duração desse fenômeno a sua causa pode estar associada ao efeito dínamo perturbado. Nesse mesmo período houve um forte aumento da altura do pico da camada F, da ordem de 180 km de amplitude, que é claramente mostrado pelo gráfico do parâmetro hpF₂ o qual representa a altura do pico da camada F, conforme claramente mostra a curva de foF₂. Por outro lado a base da camada F, representada pelo parâmetro h'F mostra uma subida mais modesta (subida de cerca de 40 km).

Entre 14HL e 18HL do dia 6 não houve dados de ionossonda.

A partir das 18HL do dia 6 houve uma forte inibição da subida da camada até o pico da reversão da velocidade que ocorre aproximadamente às 20HL do dia 6 conforme mostra a curva dos dias quietos decorrente dos ventos perturbados (*Disturbance Dynamo Winds*) procedentes da região auroral.

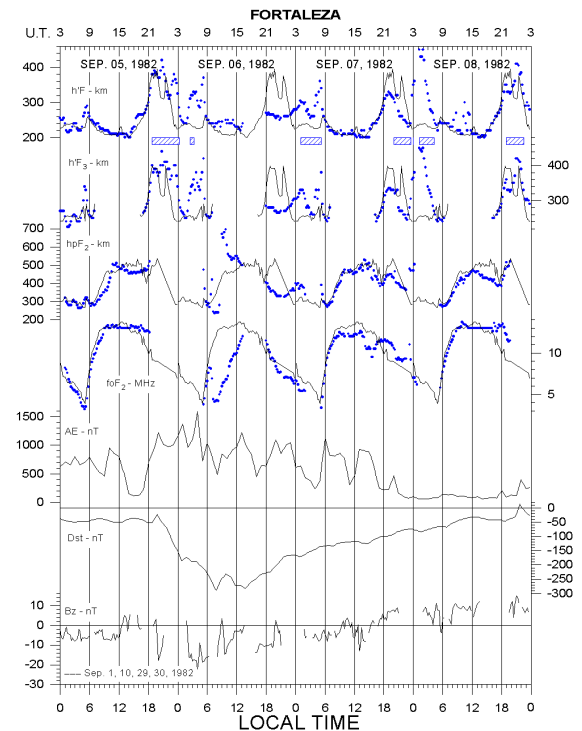


Figura 2: Parâmetros ionosféricos e geomagnéticos durante 05-08/09/1982 para a localidade de Fortaleza. Os retângulos hachurados representam a ocorrência do spread-F. Os pontos dos parâmetros ionosféricos representam os dias perturbados. Enquanto que as linhas contínuas representam o valor médio dos dias quietos indicados no lado inferior esquerdo. Os parâmetros da camada F são: h'F – altura virtual da base da camada F; h'F₍₃₎ – altura virtual da camada F em 3 MHz; hpF₂ – altura virtual do pico da camada F segundo uma interpolação parabólica; e foF₂ – frequência de corte da camada F2. Os dados de Bz foram obtidos pelo satélite ISEE3.

O forte aumento registrado por volta das 03HL do dia 7 ocorreu junto com um forte aumento de amplitude do índice AE. Não há dados de Bz nessa ocasião, porém os dados de horas próximas não sugerem que tenha havido fortes variações de Bz. A subida da camada no dia 7 também foi bastante inibida e possivelmente associada à forte atividade de convecção ocorrida nas últimas 48 horas.

A subida da camada F no dia 8 foi aproximadamente normal, ou seja, equivalente ao dia quieto, fato que já era esperado dado que não lhe precederam variações bruscas de Bz e nem uma atividade auroral intensa. De fato a atividade auroral esteve quiescente nas 18 horas que precederam o aumento da camada rumo ao pico da reversão. A subida da camada por volta da 07HL do dia 8 permanece uma incógnita dado que os valores dos índices geomagnéticos permaneceram quiescentes no período.

CONCLUSÕES

Foram analisados os efeitos das tempestades magnéticas sobre a região de Fortaleza durante o período de 5 a 8 de setembro de 1982. Devido ao fato de Fortaleza estar localizada bem próxima ao equador magnético, os efeitos de subida e descida de altura da camada são provocados por campos elétricos zonais. A ação dos ventos nessa região é minoritária dada a baixa inclinação do campo geomagnético naquela localidade. Ficou bem caracterizado um efeito de penetração de campos elétricos às 20HL do dia 5 que ocorreu simultaneamente com a reversão da componente vertical do campo magnético interplanetário Bz. Verificou-se no dia 6 uma forte inibição de subida da camada F associada ao efeito dínamo perturbado (ventos termosféricos perturbados soprando de leste para oeste). O mesmo aconteceu no dia seguinte, exceto que com menor intensidade. A densidade eletrônica no pico da camada apresentou variação mais forte por ocasião da subida da camada por volta das 06 HL.

REFERÊNCIAS

- ABDU, M. A.; REDDY, B. M.; WALKER, G. O.; HANBABA, R.; SOBRAL, J. H. A.; FEJER, B. G.; WOODMAN, R. F.; SCHUNK, R. W.; SZUSZCZEWICZ, E. P. "Processes in the Quiet and Disturbed Equatorial Low Latitude Ionosphere: SUNDIAL Campaign 1984". *Ann. Geophysical*, 69(T1), 69-80, 1988.
- ABDU, M. A.; WALKER, G. O.; REDDY, B. M.; SOBRAL, J. H. A.; FEJER, B. G.; KIKUCHI, T.; TRIVEDI, N. B.; SZUSZCZEWICZ, E. P. "Electric Field Versus Neutral Wind Control of the Equatorial Anomaly Under Quiet and Disturbed Condition - A Global Perspective". *Ann. Geophysicae*, 8(6), 419-430, 1990.
- ABDU, M. A.; BATISTA, I. S.; WALKER, G. O.; SOBRAL, J. H. A.; TRIVEDI, N. B.; DE PAULA, E. R. "Equatorial Ionospheric Electric Fields During Magnetospheric Disturbances: Local Time/Longitude Dependences from Recent EITS Campaigns." *J. Atmos. Terr. Phys.*, 57(10), 1065-1083, 1995.
- ABDU, M. A.; SOBRAL, J. H. A.; RICHARD, P.; de GONZALES, M. M.; HUANG, Y. N.; REDDY, B. M.; CHENG, K.; SZUSZCZEWICZ, E. P. and BATISTA, I. S. "Zonal/Meridional Wind and Disturbance Dynamo Electric Field Control of the Low Latitude Ionosphere during the SUNDIAL/ATLAS-1 Campaign". *J. Geophys. Res.*, 101(A12), 26729-26740, 1996a.
- ABDU, M. A.; SASTRI, M. A.; MAC-DOUGALL, J.; BATISTA, I. S.; SOBRAL, J. H. A. "Equatorial Disturbance Dynamo Electric Field, Longitudinal Structure and Spread: a Case Study from GUARA/EITS Campaigns". *Geophys. Res. Lett.*, submitted, 1996b.
- ABDU, M. A.; SOBRAL, J. H. A.; BATISTA, I. S.; RIOS, V. "Equatorial Spread-F Occurrence Statistics in the American Longitudes: Diurnal, Seasonal and Solar Cycle Variations". *Adv. Space Res.* Submitted, 1996c.
- FEJER, B. G.; KELLEY, M. C.; SENIOR, C.; DE LA BEAUJARDIERE, O.; HOLT, J. A.; TEPLEY, C. A.; BURNSIDE, R. G.; ABDU, M. A.; SOBRAL, J. H. A.; WOODMANN, R. F.; KAMIDE, Y. and LEPPING, R. "Low and Midlatitude Ionospheric Electric Fields During the January 1984 GISMOS Campaign". *J. Geophys. Res.*, 85(A3), 2367-2377, 1990.
- FEJER, B. G. "Low latitude electrodynamic plasma drifts: a review". *J. Atmos. Terr. Phys.*, 53, 677-693, 1991.
- SPIRO, R. W.; WOLF, R. A.; FEJER, B. G. "Penetration of high-latitude-electric-field effects to low latitudes during SUNDIAL 1984". *Ann. Geophys.*, 6, 39-50, 1988.
- SOBRAL, J. H. A.; ABDU, M. A.; GONZÁLEZ, W. D.; TSURUTANI, B. T.; BATISTA, I. S. "Effects of intense storms and substorms on the equatorial ionosphere/thermosphere system in the American sector from ground based and satellite data". *J. Geophys. Res.*, 102, 14305-14313, 1997.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPESP – Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo (Processo nº 96/12337-2-) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico CNPq (Processos 520185/95-1 e 522919 pelos apoios que contribuíram para a execução deste trabalho.