



Efeitos de Tempestades Magnéticas Intensas na Ionosfera das Regiões Equatorial e de Baixa Latitude

J. H. A. Sobral, M. A. Abdu, W. D. González, Alícia Clúa de González, Cristina S. Yamashita, I. S. Batista, C. J. Zamlutti

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Abstract

Durante as tempestades magnéticas a ionosfera nas regiões equatorial e de baixa latitudes podem sofrer fortes alterações em altura e concentração de plasma através de mecanismos ainda não muito bem conhecidos, principalmente nos casos de tempestades magnéticas de alta intensidade. Este trabalho apresenta os efeitos inéditos de cerca de três ocorrências de tempestades magnéticas muito intensas, sobre Fortaleza (região equatorial) e Cachoeira Paulista (baixa latitude), ocorridas em dezembro de 1980, abril de 1981 e setembro de 1982, oferecendo uma oportunidade única de se comparar os referidos efeitos nas duas regiões geográficas aqui consideradas. Fortíssimas variações da altura da camada F foram registrados em ambas localidades, como decorrentes tanto da penetração de campos elétricos em baixas latitudes oriundos de altas latitudes (região auroral) como também efeitos, ao pôr do sol, de inibição da subida da camada na região equatorial decorrente da ação do do efeito dínamo perturbado.

INTRODUÇÃO

As tempestades magnéticas são caracterizadas pela intensificação das correntes anel no cinturão interno de radiação de van Allen cujo diagnóstico em nível de solo é geralmente feito pela queda substancial da componente horizontal do campo magnético terrestre na zonal equatorial. Tal fenômeno é gerado inicialmente pela formação de campos elétricos na magnetosfera terrestre, dirigidos para oeste, no setor noturno, que se combinam com o campo magnético terrestre, e empurram por difusão ambipolar (efeito **EXB**), o plasma magnetosférico em direção ao cinturão de radiação interno de van Allen, inflando tal região de plasma e intensificando as correntes anel. Os efeitos dessas tempestades, porém, não se limitam à geração das referidas correntes anel. Campos elétricos perturbados podem ser criados no domínio do sistema ionosfera/termosfera (Abdu et al, 1995; Abdu, 1997; Fejer e Scherliess, 1997; Scherliess e Fejer, 1997; Sobral et al., 1997), e esse é o tema do presente estudo que focaliza as componentes dos campos elétricos perturbados dirigidos para leste/oeste que empurram a ionosfera para cima/baixo de forma anômala (veja mais detalhes desse fenômeno na próxima seção). Além da intensificação das correntes anel formam-se também, durante os períodos perturbados, fortes intensificações nas correntes do eletrojato auroral, decorrentes da injeção de plasma magnetosférico naquela região. Este fenômeno pode causar aumento de intensidade do índice AE cuja amplitude representa o envólucro dos perfis magnetométricos de uma cadeia de magnetômetros localizada na região auroral boreal. Tais atividades dinâmicas da região auroral podem transmitir campos elétricos por dois processos. Um deles é transmitido instantaneamente por ondas eletromagnéticas desde a região auroral até a região equatorial, fenômeno que é conhecido como penetração de campos elétricos (Abdu et al, 1995; Abdu, 1997; Scherliess e Fejer, 1997; Sobral et al., 1997). O outro processo é transportado pela termosfera através do vento termosférico perturbado que chega à região equatorial de duas a quatro horas depois da sua geração na região auroral.

METODOLOGIA

A ionosfera terrestre apresenta um comportamento bastante alterado durante os dias geomagneticamente perturbados em relação ao dos dias quietos. Ela pode subir ou descer de altura de forma anômala, ao longo do dia, ou aumentar ou diminuir de concentração. Dessa forma, o método mais direto para se estudar as variações desses parâmetros, é compará-los com a variação média deles dos dias quietos. Foi isso o que foi feito nesse trabalho, por meio de dados de ionossondas de Fortaleza e de Cachoeira Paulista. Foi selecionada uma série de dias quietos dentro de um intervalo de 30 dias aproximadamente centrados nos dias perturbados, evitando-se, dessa forma, a influência da variação sazonal no valor médio dos parâmetros ionosféricos dos dias quietos. Os dias quietos utilizados para obter-se as médias dos parâmetros ionosféricos estão indicados no canto inferior esquerdo das Figuras 1, 2 e 3. Os parâmetros escolhidos para este estudo foram os seguintes: 1) altura virtual ($h'F$) que representa a altura da base da camada F, 2) altura aproximada do pico da camada F, $hpF2$, e 3) frequência de corte da camada F, $foF2$. A outra base para a análise dos efeitos ionosféricos durante as tempestades magnéticas são os seguintes índices geomagnéticos: 1) o índice de

atividade auroral AE acima mencionado, cuja intensidade é proporcional às correntes do eletrojoato auroral, 2) a curva do dínamo perturbado, ou *Disturbance Dynamo*, Dst, que representa a variação média da componente horizontal do campo geomagnético na região de baixa latitude e 3) a componente vertical do campo magnético interplanetário Bz, que foi obtida pelo satélite ISEE-3 e que nos foi gentilmente cedida pelo Professor Bruce Tsurutani do Laboratório de Propulsão a Jato de Pasadena (Jet Propulsion Laboratory). A fim de se comparar as os efeitos na região equatorial e de baixa latitude, utilizamos dados de Fortaleza-FZ e Cachoeira Paulista-CP. A queda abrupta da curva Dst durante uma tempestade magnética é conhecida como fase principal (*Main Phase*) da tempestade e a posterior subida denomina-se recuperação (*Recovery Phase*) da tempestade.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Durante o período de ocorrência das tempestades magnéticas aqui apresentadas foram obtidos dados de ionosonda de FZ e CP. Os resultados estão mostrados nas Figuras 1, 2 e 3, e correspondem a três eventos de tempestades magnéticas muito intensas ocorridas nos períodos indicados nas figuras. A primeira curva de cima é h'F para FZ. A curva seguinte é h'F para CP. E assim por diante alternado-se FZ e CP de cima para baixo. Os pequenos retângulos hachurados que aparecem abaixo do primeiro perfil representam a ocorrência do fenômeno F-espalhado, ou *spread-F* em FZ, que ocorre durante as fortes subidas da camada F logo após o pôr do sol. De um modo geral, podemos esperar nessa análise dois tipos de efeito na altura da camada F. O primeiro é o que se conhece por penetração de campos elétricos aurorais para baixas latitudes. Nessa hipótese os efeitos são simultâneos em ambas localidades, isto é, FZ e CP, pelo fato de a referida penetração acontecer através de propagação de onda eletromagnética via atmosfera. No segundo caso, a ionosfera sofre efeitos produzidos pelos ventos neutros da termosfera e distingue-se do caso anterior pelo efeito retardado em cerca de duas a quatro horas, que é o tempo que levam os ventos termosféricos gerados pelo efeito Lorentz percorrerem o caminho que se estende da região auroral até o equador. Esse efeito pode acontecer de duas formas, dependendo da direção do vento. O vento na direção de sul para norte (norte para sul) faz com que a camada F suba (desça) na região de CP, ao longo da linha de campo geomagnético. Tal movimento não ocorre na altura do equador devido à baixa inclinação do campo magnético terrestre naquela região. Os efeitos das tempestades magnéticas aparecem muito bem destacados nessas três figuras, ou seja, os parâmetros h'F, hpF2 e foF2 apresentam grandes desvios em relação aos dias quietos. As tempestades estão caracterizadas nas três figuras em ambas as suas fases, ou seja, a fase principal e a fase de recuperação.

Na Figura 1 o início da curva Dst é quieto nas primeiras 9 horas e em seguida cai de intensidade, iniciando a fase principal da tempestade. Nas outras duas figuras o esse período se estende por cerca de 18 horas. Durante esse início quieto da curva Dst pode-se observar um comportamento mais quieto da ionosfera. Às 15 HL do dia 19 inicia-se recuperação. O índice AE apresenta um aumento entre 02 e 05 HL e um segundo aumento mais forte às 09 HL que dura cerca de 8 horas com intensidade nitidamente forte. A partir das 18 HL do dia 19 o índice AE apresenta valores mais baixos e mais regulares.

A Figura 1 mostra uma forte inibição da subida da camada no dia 19 que é típica da ação do dínamo da região F perturbado, resultando na não formação do traço F-espalhado (*spread-F*). Nas noites subseqüentes à subida da camada quase não apresentou anomalias. O traço F-espalhado ocorreu nesses três dias devido à alta velocidade de subida durou em média cerca de 8 horas. A tempestade inicia-se por volta das 0900 HL com uma forte queda do índice Dst e um simultâneo aumento na convexão auroral, manifestado pelo súbito aumento de intensidade do índice AE. Portanto, a inibição da subida da camada nesse dia está claramente associada à ação dos ventos termosféricos perturbados, ou dínamo perturbado (*disturbance dynamo*). Um detalhe interessante é a subida do pico da camada, hpF2 em Fortaleza por cerca de 10 LT junto com o começo da tempestade magnética, e com uma duração de apenas uma hora aproximadamente sugerindo uma penetração de campos elétricos na região de Fortaleza. Não existem dados de h'F ou hpF2 para CP nesse intervalo de tempo para verificar tal ocorrência em CP. Após essa rápida subida e descida, aconteceu uma outra subida no mesmo dia 19 por volta das 12 HL que durou cerca de 4 horas. Pelo atraso desse

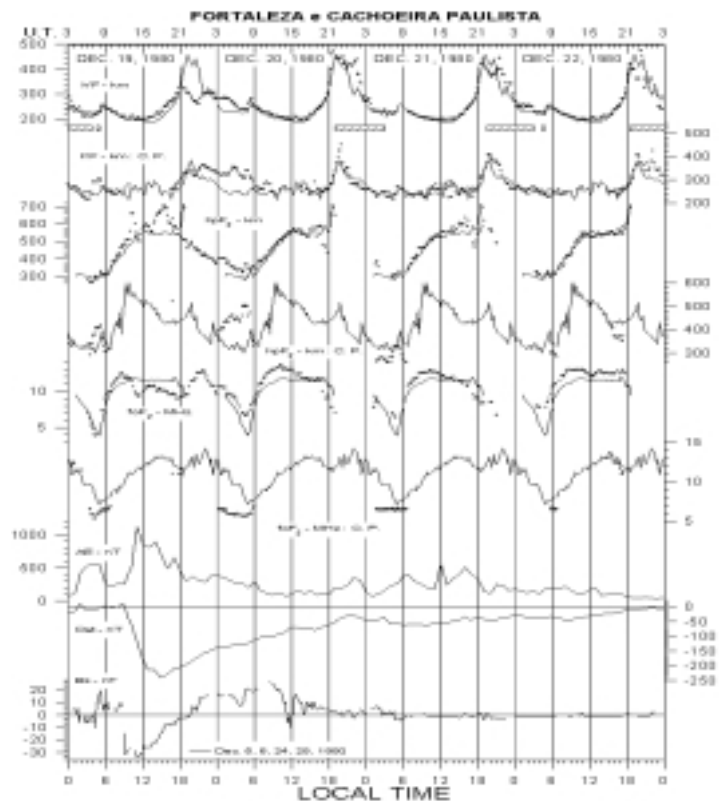


Figura 1 – Variação dos parâmetros ionosféricos h'F, hpF2, foF2 para CP e FZ (veja o texto) e índices AE e Dst. Os dias perturbados/quietos são representados por pontos/linha contínua.

efeito, da ordem de aproximadamente 3 horas, este efeito parece estar associado aos aumentos do índice AE e o início da fase principal da tempestade (queda de Dst). O comportamento quiescente da ionosfera nos três últimos dias da Figura 1 estão associados ao comportamento quiescente do campo geomagnético no segundo, terceiro e quarto dias conforme claramente mostrado pela suavidade das variações Dst e AE. Somente na Figura 1 podemos ver tal quiescência perdurando três dias. É interessante notar também o decréscimo de foF2/ FZ no primeiro dia às 10 HL, decorrente da subida da camada F por volta do mesmo horário. A forte subida de hpF2 em FZ iniciando-se às 00 HL está de acordo com o modelo empírico de Scherliess e Fejer (1997) que prevê os mais fortes aumentos de altura decorrentes do aumento do índice AE para um intervalo de até aproximadamente 10 horas após o início do aumento daquele índice, o que sugere portanto que tal efeito de subida de altura da camada seja decorrente de ventos termosféricos perturbados. Em CP esse aumento durou muito mais, isto é, durou cerca de 9 horas, fato que está coerente com a hipótese da ocorrência do dínamo perturbado. O aumento de altura em CP pode estar associado aos efeitos dos ventos termosféricos perturbados, originários da zona auroral austral, que se deslocam em direção ao equador. Entre 00 e 06 HL do dia 20 a altura do pico da camada F em CP subiu consideravelmente e simultaneamente houve uma forte queda em foF2 na mesma localidade. Em muitos casos, durante os períodos perturbados, quando a camada F sobe de altura, observa-se um decréscimo local da frequência crítica da camada F, foF2.

A Figura 2 mostra uma tempestade magnética em duas etapas, ou seja, com duas claras quedas na curva Dst, uma delas iniciando-se às 20 HL do dia 11 e a segunda iniciando-se também aproximadamente no mesmo horário no dia seguinte. Ocorreu forte inibição na subida da camada logo após o pôr do sol nos quatro dias, sendo a inibição mais forte na tarde do dia 13, iniciando-se por volta das 18HL. A inibição da subida da camada F é a característica que mais se ressalta dos efeitos ionosféricos observados nesses quatro dias. O traço F espalhado apareceu de forma descontínua nos períodos noturnos, devido às inibições na subida da camada F. Podemos observar que durante esses quatro dias, ao contrário do caso anterior da Figura 1, o índice AE apresentou intensidades consideráveis fato que explica o efeito extensivo da tempestade magnética nesses quatro dias. Não houve dados de h'F nem hpF2 para CP nos dois primeiros dias. Essa inibição da subida da camada sugere a presença de ventos termosféricos dirigidos para oeste, inibindo o vento para leste que normalmente se encontra nesse horário que cria os campos elétricos para leste. Subidas de h'F no período entre 00 HL e 06 HL decorrentes da penetração de campos elétricos na região equatorial foram previstas pelo modelo de Spiro et al. (1988), para o caso de

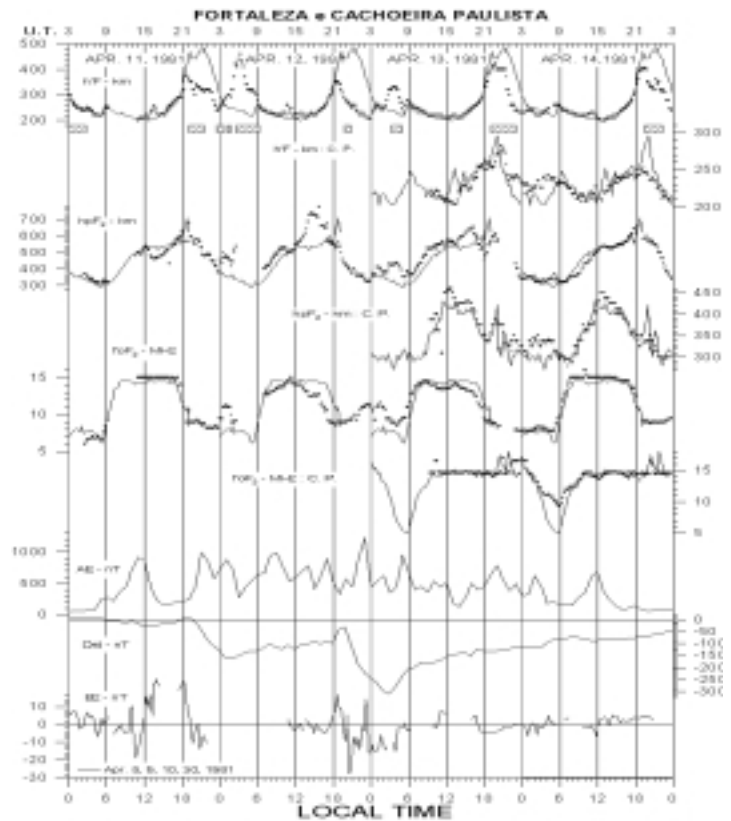


Figura 2 – O mesmo que a Figura 1 exceto que para os dias indicados nesta figura.

F sobe de altura, observa-se um decréscimo local da frequência

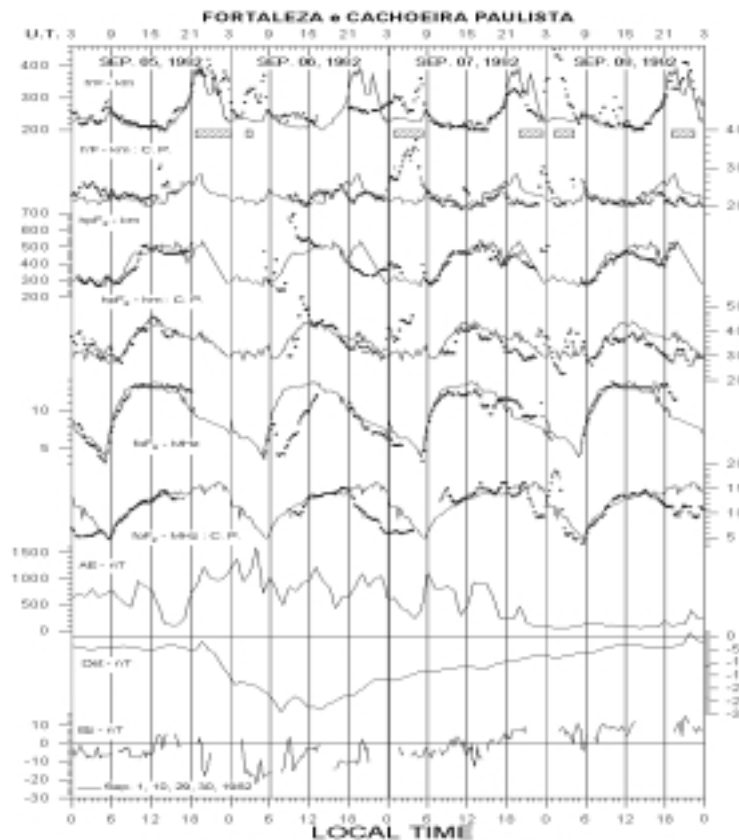


Figura 3 - o mesmo que a Figura 1 exceto que para o período 5 – 8 de setembro e 1982.

decréscimo de convecção. Temos na Figura 2 dois exemplos dessa subida nos dias 12 e 13. Porém não está evidenciado nesses casos o decréscimo do índice AE. Outra dificuldade de associação com tal previsão é a duração da subida. O modelo de Spiro et al. (1988) prevê que tais efeitos duram da ordem de minutos ou poucas horas e aqui estamos observando os efeitos durarem várias horas. A partir das 21 HL do dia 13 e durante as primeiras 6 horas do dia 14 a camada F manteve-se elevada em CP, tanto na base da ionosfera h'F como no pico hpF2. Esse aumento não é observado em FZ. Ao contrário, observa-se menor altura h'F. Os ventos termosféricos perturbados didigindo-se ao equador causam uma elevação da camada em CP e inibem a subida da camada em FZ através da geração de campos elétricos voltados para oeste nesta última localidade.

A Figura 3 mostra a tempestade mais forte dos três eventos em termos do índice AE que atingiu o valor de cerca de 1500 nano Tesla (nT). No dia 6 a camada subiu consideravelmente possivelmente causado por uma penetração de campos elétricos à 01 HL associada a uma forte inversão de Bz para o sul. Na noite seguinte, entretanto, tal subida é vista tanto em CP como em FZ sendo que em CP o fenômeno aparece de forma muito mais demorada. Em Fortaleza a subida resultou no *spread F* representado pelo retângulo hachurado. A maior duração da subida em CP sugere a ação de ventos termosféricos em direção ao equador, superposto aos campos elétricos zonais que causaram a subida da camada nas duas localidades. A inibição da subida da camada é típica da ação de ventos do dínamo perturbado da região F (disturbance dynamo) dirigidos para oeste. A forte queda em foF2 em Fortaleza no dia 6 iniciando-se por volta das 0630 HL não se reflete no aumento de foF2 em CP sugerindo a inexistência do efeito fonte (*Fountain Effect*). Às 05 HL do dia 5 a camada sofre um aumento de altura em FZ e CP causado por uma penetração de campo elétrico durante a inversão de polaridade, de sul para norte, de Bz.

CONCLUSÕES

Foram analisados cerca de três eventos de tempestades magnéticas nas regiões brasileiras Cachoeira Paulista (CP) e Fortaleza (FZ), baseados em dados de ionossonda obtidos daquelas duas localidades, complementados por dados da componente vertical do campo magnético interplanetário Bz, e curvas dos índices AE e Dst. A ionosfera dessas duas regiões apresentaram-se bastante afetadas pelas referidas tempestades, apresentando fortíssimas variações de altura da camada F2 através da penetração de campos elétricos aurorais para aquelas duas regiões latitudinais e através de ventos termosféricos causados pelo dínamo perturbado. Tais efeitos foram parcialmente identificados através de comparação feita com resultados computacionais do modelo de efeitos de tempestades magnéticas de Spiro et al., 1988 e dos modelo empírico para os efeitos de dínamo perturbado de Fejer e Scherliess (1997) e Scherliess e Fejer (1997). A comparação dos resultados experimentais em CP e FZ permitiram observar a predominância da ação dos campo elétricos perturbados sobre os ventos perturbados na região de Fortaleza, e uma maior parcela de atuação dos ventos termosféricos na região de CP, além da ação dos campos elétricos de penetração ou de dínamo perturbado.

REFERÊNCIAS

- Abdu, M. A., 1997, *Major Phenomena of the Equatorial Ionosphere-Thermosphere System under Disturbed Condition*, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 59, 1505-1519.
- Abdu, M. A., Batista, I. S., Walker, G. O., Sobral, J. H. A., Trivedi, N. B., Paula, E. R. de, 1995, *Equatorial Ionospheric Electric Fields During Magnetospheric Disturbances: Local Time/Longitude dependences from EITS Campaigns*, *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics* 57, 1065-1083.
- Fejer, B. G., Scherliess, L., , 1997, *Empirical Models of Storm Time Equatorial Zonal Electric Fields*, *Journal of Geophysical Research* 102, 24047-24056.
- Sobral, J. H. A., Abdu, M. A., González, W. D., Tsurutani, B. T., Batista, I. S. e González, Alicia Clua de, 1997, *Effects of Intense Storms and Substorms on the Equatorial Ionosphere/Thermosphere System in the American Sector from Gound-Based and Satellite Data*, *Jouranl of Geophysical Research* 102, 14.305-14313.
- Spiro, R. W., Wolf, R. A., Fejer, D. G., 1997, *Penetration of High Latitude Electric Fields Effects to Low Latitudes*, *Annales Geophysicae* 6, 39-50,
- Scherliess, L., Fejer, B. G., 1997, *Storm Time Dependence of Equatorial Disturbance Dynamo Zonal Electric Fields*, *Journal of Geophysical Research* 102, 24037-24046.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi parcialmente apoiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP através do Processo no.97/12337-2 (C. S. Yamashita) e pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq Processos números 522919/96-0 (J.H.A.Sobral) e 520185/95-1 (M. A. Abdu). Os dados do meio interplanetário foram cedidos pelo Dr. B. T. Tsurutani do Jet Propulsion Laboratory (JPL) de Pasadena, U. S. A.