



Resultados de Observações do Eletrojato Equatorial Utilizando um Radar de Espalhamento Coerente de 50 MHz no Brasil

C. M. Denardini, M. A. Abdu, J. H. A. Sobral

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, 12201-970 São José dos Campos, Brasil.

ABSTRACT

Um radar de espalhamento coerente desenvolvido no INPE está operando parcialmente no equador magnético, em São Luís (2,33° S; 44,2° O; dip: -0,5°), no Brasil. O radar tem frequência de operação de 50 MHz, e foi projetado para transmitir pulsos com pico de potência de 120 kW. Entretanto, o radar foi operado somente com capacidade parcial de ~40 kW nas primeiras medidas da dinâmica das irregularidades do eletrojato, conduzidas durante uma semana de agosto de 1998. Algumas características do radar são discutidas nesse trabalho, e são comentados os primeiros resultados obtidos pela análise dos dados já reduzidos. Alguns dias de observação cobriram um intervalo perturbado, relacionado com a forte tempestade magnética do dia 27 de agosto de 1998 (Dst>140). A intensidade do eletrojato mostrou grande flutuação em resposta a penetração imediata de campos elétricos magnetosféricos até latitudes equatoriais, indicado por flutuações simultâneas no índice de atividade auroral, e nos magnetogramas das estações de São Luís e Valentia (51,9° N; 10,2° O). Longos períodos de total inibição dos processos de instabilidades de plasma também foram observados, os quais sugerem que distúrbios dos campos do dínamo podem estar relacionados com a tempestade magnética.

INTRODUÇÃO

O radar de espalhamento de São Luís detecta energia espalhada de um meio onde variações espaciais de densidade de plasma ou irregularidades estão presentes. O processo de espalhamento é essencialmente uma reflexão parcial causada pela descontinuidade do índice de reflexão devido à presença de irregularidades de densidades (Hargreaves, 1992). O radar utiliza uma frequência fixa de transmissão de 50 MHz. Para a finalidade de uso desse radar, uma única antena não tem ganho suficiente para detectar os sinais de espalhamentos que são bastante fracos. Portanto, fez-se uso de um conjunto de antenas que gera um feixe altamente direcional. Para alimentar o conjunto de antenas de maneira uniforme, é realizada uma divisão do sinal a ser enviado. Há também, um circuito que recebe os ecos recolhidos pelo conjunto de antenas, que agrupa-os em um único sinal e verifica a existência dos 50 MHz no eco.

Utilizando esse radar ionosférico estudamos a dinâmica do eletrojato equatorial, através das variações na densidade eletrônica local que são fortemente alinhadas ao campo geomagnético, denominadas irregularidades ionosféricas. Essas irregularidades estão presentes dia e noite, exceto durante curtos períodos no alvorecer e ao anoitecer (Kudeki, 1983). Os primeiros experimentos de espalhamento ionosféricos em VHF (Bowles et al., 1960; Bowles e Cohen, 1962) mostraram que os ecos recebidos com essa técnica eram devido ao espalhamento dos pulsos de radar nas irregularidades do eletrojato equatorial. O radar de São Luís operou durante 8 dias consecutivos na campanha de agosto de 1998, onde foram recolhidos os primeiros dados de pesquisa ionosférica utilizando radar de espalhamento coerente no Brasil. A análise preliminar de alguns dos dados já processados é discutida nesse trabalho.

CARACTERÍSTICAS DO RADAR

O sistema do radar foi desenvolvido com seus parâmetros baseados no tipo de estudo a ser conduzido. a) Localização do radar: uma vez que as irregularidades são alinhadas ao campo, obtém-se ecos mais fortes se o radar estiver no plano normal à direção do campo geomagnético (Hargreaves, 1992). Portanto, o radar foi instalado em São Luís, onde está localizado no equador magnético e próximo ao centro do eletrojato equatorial. b) Frequência de operação: a frequência escolhida para o radar foi de 50 MHz, pois as irregularidades de grande tamanho (3m) são mais frequentes. Também porque, para obter ecos coerentes das irregularidades, o radar deve operar na frequência tal que o comprimento de onda seja o dobro do tamanho das irregularidades, para que os sinais recebidos sejam coerentes e de grande amplitude. c) Sistema de sinal pulsado: apesar de uma grande precisão na medida de deslocamento Doppler exigir sinal de onda contínua, o sistema de sinal foi escolhido pulsado, pois estes permite facilmente determinar a altura de espalhamento do sinal. Além disso, o deslocamento Doppler pode ser obtido usando um radar Doppler Pulsado (Skolnik, 1962). d) Frequência de repetição de pulso (PRF): a PRF é limitada para evitar ambiguidade na medição da altura de reflexão, porém deve ser pelo menos duas vezes maior que o máximo deslocamento Doppler esperado. Entretanto, as irregularidades nas alturas da região E propagam-se com velocidades diferentes das irregularidades nas alturas região F. Dessa forma, a PRF é completamente variável de 100 à 1000 Hz. e) Potência do transmissor: para estudarmos as irregularidades na região E, com uma boa precisão no sinal de retorno recebido, necessitamos que a

potência transmitida seja de alguns quilowatts. Porém, estudos na região F requerem uma potência de dezenas de quilowatts. Desde que há interesse em estudar também irregularidades na região F (*Spread F*), os transmissores devem prover uma potência máxima de aproximadamente 120 kW. f) **Sistema de antenas:** ele é formado por 768 dipolos feitos de cabo coaxial. Eles estão arranjados de modo a formar um conjunto de 16 antenas ligadas duas a duas, alinhadas na direção norte-sul. Cada antena é formada por 48 dipolos ligados em série. Com essa configuração obtém-se uma largura de feixe da antena de 3° na direção norte-sul e 5° na direção leste-oeste. g) **Sistema receptor:** o sistema receptor utiliza um sistema de chaves T/R, tornando possível receber os ecos retroespalhados das irregularidades no mesmo conjunto de antenas em que os pulsos foram transmitidos. Após a verificação da presença dos 50 MHz e de uma amplificação para melhorar a qualidade, o eco passa por um sistema que separa e grava a informação obtida.

TÉCNICA DE ANÁLISE DE DADOS

Na técnica de radares, uma parte do pulso transmitido é retroespalhado por uma região onde as irregularidades têm dimensão igual à metade do comprimento de onda do sinal transmitido do radar, na direção do vetor de onda do radar. Assim, no caso do radar de São Luís que opera a 50 MHz ($\lambda=6\text{m}$) o sinal será retroespalhado por irregularidades com comprimento em torno de 3 m. Pelo processamento e análise de pulsos sucessivos gera-se o gráfico de amplitude espectral de frequência Doppler para cada altura de estudo. Para geração desse gráfico, utiliza-se a técnica da transformação integral de Fourier, e observa-se a distribuição da frequência, ou seja, as velocidades das irregularidades através do deslocamento do pico de distribuição, devido ao efeito Doppler. Pela integração da distribuição de cada altura para todos os conjuntos de dados, obtém-se o mapa de variação temporal de intensidade versus altura (mapa RTI). Nesse mapa pode-se verificar a presença e o comportamento do eletrojato ao longo do dia.

Quando um sinal retroespalhado é recebido pelo conjunto de antenas, ele é amostrado pelo sistema receptor e cada amostra do sinal é passada por dois detetores de fase. Esses detetores de fase comparam a amostra, que possui informação do deslocamento Doppler, com um sinal de referência do radar, e provém uma saída de sinal em quadratura (seno) e outra em fase com sinal de entrada (coseno). O número de amostras do sinal determina o número de faixas de alturas escolhidas para observação. Do conjunto de amostras de pulsos sucessivos, em processamento posterior obtém-se a informação sobre o deslocamento Doppler e sobre a potência total retroespalhada para cada altura.

Os sinais resultantes da comparação são passados por filtros passa baixa de 50 kHz. Assim, é filtrada a onda portadora, restando somente as informações de amplitude e largura de cada amostra. A figura 1 apresenta de forma esquemática a primeira filtragem de informação utilizando os detetores de fase e os filtros passa baixa de 50 kHz.

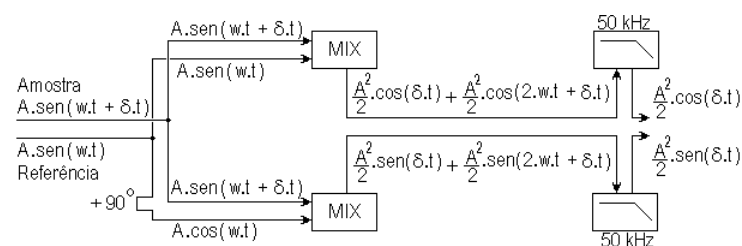


Figura 1 – Esquema de funcionamento da primeira filtragem de informação utilizando os detetores de fase e os filtros de 50 kHz. Nessa figura, A é a amplitude de uma onda genérica, δ é a frequência devido ao efeito Doppler e w é a frequência de 50 MHz do sinal emitido.

análise computacional que utiliza o método de transformada integral de Fourier para determinar o deslocamento Doppler. Pela utilização desse método, obtém-se os gráficos de amplitude espectral de frequência Doppler para cada faixa de altura de estudo. Pela localização do pico da distribuição de frequências Doppler, e utilizando a equação (1), determina-se a velocidade de deslocamento (Terman, 1955).

$$f_d = \frac{2v_i}{\lambda} = \frac{2v_i f_0}{c} \quad (1)$$

Integrando as amplitudes de frequência Doppler recebida para todas as frequências, determina-se a potência total de sinal recebido para cada faixa altura. Aplicando essa integração em todo o conjunto de dados, obtém-se o mapa RTI.

RESULTADOS E DISCUSSÕES FINAIS

Na campanha realizada em agosto de 1998, recolhemos informações relacionadas ao eletrojato equatorial, durante oito dias consecutivos, e na análise dos dados já reduzidos, observamos o aparecimento de fenômenos como o do dia 31 de agosto, onde verificamos a redução da altura do eletrojato equatorial próximo ao meio-dia local e o seu aparecimento somente em três períodos específicos do dia, observados no mapa RTI. Neste dia tivemos também um aumento súbito no valor do índice Dst, indicando que algum distúrbio magnético estava ocorrendo. A figura 2 apresenta: o índice Dst horários; o valor da componente **H** do campo geomagnético medida em São Luís, com magnetômetro fluxgate; o mapa RTI; e os índices aurorais AU e AL, durante a aquisição de dados pelo radar para o dia 31 de agosto.

Kudeki e Fawcett [1993] conduziram, em agosto de 1992 e janeiro/fevereiro de 93, observações de radar emitindo sinal pulsado de 50 MHz para o estudo da parte superior da região E (150 km de altitude), sobre o *Jicamarca Radio Observatory*, próximo ao equador magnético, durante os horários diurnos. Em seus estudos foi observado um

decréscimo regular pela parte da manhã e uma aparente ascensão pela parte da tarde na altura observada das irregularidades ionosféricas, em todos os mapas RTI. Uma vez que eles não encontraram nenhuma referência na literatura para qualquer tendência de deslocamento vertical nos ecos obtido da parte superior da região E, atribuíram a presença dessa característica à variação do ângulo de zênite solar. Durante os horários em que o ângulo de zênite é mínimo, a ionização fotoquímica intensifica-se e a altitude de penetração de partículas ionizantes ocorre até altitudes mais baixas. Portanto, a redução na altura do eletrojato próximo ao meio-dia do dia 31, poderá ser atribuída à intensificação da ionização fotoquímica e à redução na altitude do pico de ionização exatamente no horário em torno das 12 horas. Esta intensificação provoca a redução na altura da densidade eletrônica do plasma ionosférico relacionada com a máxima condutividade e, por conseqüência, a corrente do eletrojato poderá ser observada em alturas mais baixas.

Em condições de dia calmo, é esperado que o eletrojato esteja a uma altura em torno de 105 km, desde, aproximadamente, às 8 horas até em torno das 17 horas. Entretanto, durante tempestades magnéticas, mesmo que moderadas, ou nos primeiros dias da fase de recuperação de uma tempestade, é esperado que o eletrojato não apareça, ou apareça muito enfraquecido (veja Abdu et al., 1997), devido à configuração dos campos do dínamo responsável pelo eletrojato equatorial ser sobreposta a uma série de campos oriundos dos distúrbios magnéticos, os quais penetraram para ionosfera equatorial através da região auroral. Nesse dia, o índice Dst estava indicando um distúrbio geomagnético crescente ($Dst = -60$). No entanto, podemos notar que em horários específicos, por determinado período, ocorreu o aparecimento do eletrojato, com relativa intensidade. Gonzales et al. [1979], investigaram possíveis fontes de perturbação do campo elétrico equatorial e concluíram que podem ocorrer perturbações devido à penetração direta de campos plasmasférico e magnetosférico para a ionosfera equatorial. Recentemente Abdu et al. [1997] apontaram que associado com distúrbios magnetosféricos ocorrem fenômenos de latitude equatoriais conhecidos como: (1) campos elétricos transientes associados com começo súbito de tempestades e (2) campos elétricos de vida curta (~2 horas) que ocorrem nas fases de desenvolvimento e de recuperação de subtempestades. Esses campos elétricos ocorrem quase que ao mesmo tempo que os eventos de alta latitude, sendo chamados de campos de penetração imediata. Outro fator importante é que a condutividade elétrica na região E equatorial apresenta valores bastante elevados e, portanto, a ionosfera desta região é muito sensível a estes efeitos provocados por distúrbios polares devido à interação vento solar-magnetosfera. Gonzales et al. [1979] apontaram evidências através de estudos de magnetômetros indicando que as ionosferas equatorial e polar ficam fortemente acopladas durante períodos magneticamente ativos. Abdu et al. [1998] concluíram de seus estudos, que a ocorrência coerente de flutuações magnéticas em altas latitudes e no equador, implica que campos elétricos magnetosféricos penetram na ionosfera equatorial através da ionosfera polar, durante o período iluminado pelo Sol. Esta penetração dá-se quase que instantaneamente, dirigida por correntes Pedersen ionosféricas responsáveis pelas flutuações do tipo DP2 (Sastri et al., 1993) e é amplificada pelo efeito Cowling.

Na figura 2, podemos observar também que a medida que o índice Dst está decaindo, a intensidade com que o eletrojato parece está diminuindo, indicando uma dificuldade para que as condições de campos que formam o eletrojato sejam estabelecidas. Estudos mais detalhados desse evento estão em andamento. Podemos verificar também que há um acréscimo na componente **H** do campo medido pelo magnetômetro de São Luís e o aparecimento de máximos no índice auroral **AU**, aproximadamente em concordância com os

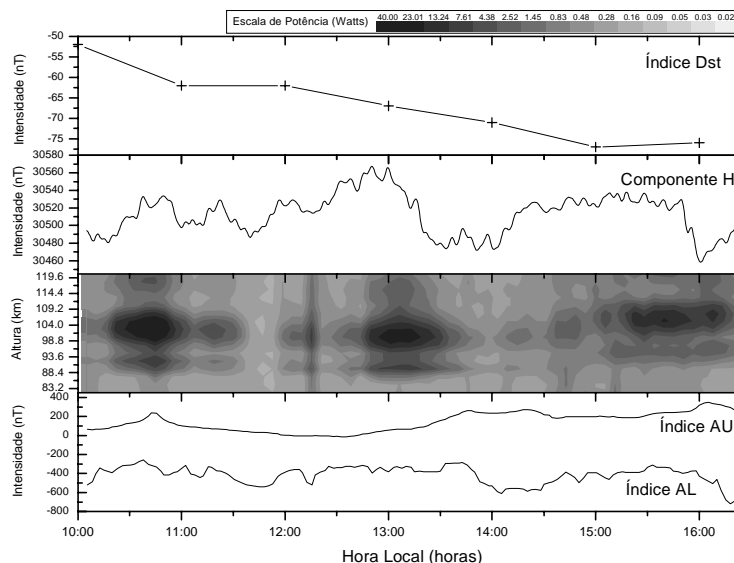


Figura 2 – De cima para baixo: índice Dst horários; valor da componente horizontal do campo geomagnético medida com magnetômetro fluxgate; mapa de variação temporal da intensidade de sinal (RTI); e índices aurais AU e AL durante a aquisição de dados pelo radar para o dia 31 de agosto de 1998.

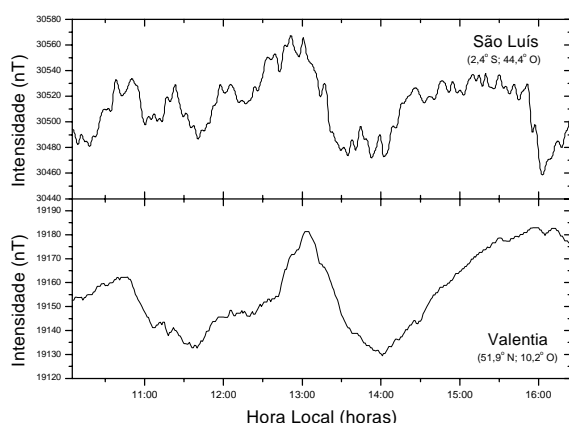


Figura 3 – Variação da componente horizontal do campo geomagnético, medida com magnetômetro das estações de Valentia (51,9° N; 10,2° O) e São Luís (2,3° S; 44,2° O). Fonte: http://spidr.ngdc.noaa.gov:8080/production/html/GEOMAG/geo_search_frames.html

horários onde verificamos a presença do eletrojato. O acréscimo na componente **H** do campo geomagnético, provavelmente é devido a campos magnéticos induzidos provocados por campos elétricos ionosférico na direção leste. E os máximos apresentados no índice *AU* indicam que está ocorrendo uma intensificação de campos elétricos no eletrojato auroral dirigido para leste.

Isso nos leva a concluir que os distúrbios magnéticos que estavam ocorrendo, caracterizados pelo acréscimo do índice *Dst*, provocaram campos elétricos para direção leste na região auroral, que se propagaram para a região equatorial através de campos elétricos transientes associados com o súbito distúrbio. A figura 3 apresenta os valores da componente **H** do campo geomagnético, medidos por magnetômetros das estações de Valentia e São Luís. Observando estes gráficos, verificamos que a mesma característica de acréscimo na componentes **H**, nos horários de aparecimento do eletrojato, está ocorrendo simultaneamente nas duas estações (correlação=0,63382). Com isto, reforçamos a idéia de campos elétricos dirigidos para leste e gerados na região auroral, provavelmente propagaram-se quase que simultaneamente até regiões equatoriais através de flutuações geomagnéticas do tipo DP2, e foram amplificados na região equatorial pelo efeito Cowling. Isso é justificável, se observarmos que a duração do aparecimento do eletrojato, é aproximadamente o período desse tipo de pulsação. Portanto, com a propagação desta perturbação pode ter sido re-estabelecida a condição de campos elétricos necessária para a formação de eletrojato nesse três horários específicos.

CONCLUSÕES

No dia 31 de agosto, o eletrojato equatorial apareceu somente em três horários determinados durante o período de operação do radar, e há redução na altura do eletrojato equatorial próxima ao meio-dia local. Nesse dia, tivemos também um aumento no valor do índice *Dst*, indicando que um distúrbio magnético estava ocorrendo. Uma possível redução na altura do eletrojato próximo ao meio-dia, poderia ser atribuída à intensificação da ionização fotoquímica e à redução na altitude do pico de ionização exatamente no horário em torno das 12 horas. Campos elétricos dirigidos para leste provavelmente propagaram-se até as regiões equatoriais através de flutuações geomagnéticas do tipo DP2, e foram amplificados na região equatorial pelo efeito Cowling. A propagação dessa perturbação pode ter re-estabelecido a condição de campos elétricos necessária para a formação de eletrojato nos três horários específicos.

Para a seqüência de trabalho utilizando o radar de espalhamento coerente, sugerimos promover estudos das bolhas de plasma, através das irregularidades da região F, em especial no período de máxima atividade solar (1999–2002), devido a sua grande interferência nas telecomunicações. Também é importante a continuidade da análise dos dados adquiridos durante a última campanha, para ratificação dos efeitos observados e estudos de outras características de irregularidades do eletrojato.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer à FAPESP que, pelo projeto nº 98/16156-8, vem financiando a bolsa de doutorado.

REFERÊNCIAS

- Abdu, M. A.; Sastri, J. H.; Luhr, H.; Tachihara, H.; Kitamura, T.; Trivedi, N. B.; Sobral, J. H. A. *DP 2 electric field fluctuations in the dusk-time dip equatorial ionosphere*. **Geophysical Research Letters**, v. 25, n. 9, p. 1511-1514, May 1998.
- Abdu, M. A.; Sastri, J. H.; MacDougall, J.; Batista, I. S.; Sobral, J. H. A. *Equatorial disturbance dynamo electric field longitudinal structure and spread F: a case study from GUARA/EITS campaigns*. **Geophysical Research Letters**, v. 24, n. 13, p. 1707-1710, Jul. 1997.
- Bowles, K. L.; Cohen, R. *A study of radio wave scattering from sporadic E near the magnetic equator*. In: Smith, E. K. e Matsushita, S. ed., **Ionospheric sporadic E**, London: Pergamon Press, 1962.
- Bowles, K. L.; Cohen, R.; Ochs, G. R.; Balsley, B. B. Radio echoes from field-aligned ionization above the magnetic equator and their resemblance to auroral echoes. **Journal of Geophysical Research**, v. 65, n. A6, p. 1853-1855, Jun. 1960.
- Gonzales, S. A.; Kelley, M. C.; Fejer, B. G.; Vickrey, J. F.; Woodman, R. F. *Equatorial electric fields during magnetically disturbed conditions 2. Implications of simultaneous auroral and equatorial measurements*. **Journal of Geophysics Research**, v. 84, n. A10, p. 5803-5812, Out. 1979.
- Hargreaves, J. K. **The solar-terrestrial environment**. Cambridge: Cambridge University Press, 1992.
- Kudeki, E. **Plasma turbulence in the equatorial electrojet**. Cornell. 186p. Tese de Doutorado - Cornell University, 1983.
- Kudeki, E; Fawcett, C. D. *High resolution observations of 150 km echoes at Jicamarca*. **Geophysical Research Letters**, v. 20, n. 18, p. 1987-1990, Sep. 1993.
- Sastri, J. H.; Rao, J. V. S. V.; Ramesh, K. B. *Penetration of polar electric field to the nightside dip equator at times of geomagnetic sudden commencements*. **Journal of Geophysics Research**, v. 98, n. A10, p. 17517-17523, Out. 1993.
- Skolnik, M. I. **Introduction to radar systems**. New York: McGraw Hill, 1962.
- Terman, F. E. **Electronic and Radio Engineering**. New York: McGraw-Hill, 1955.