

GPS: Uma Ferramenta para o Estudo do Canal Satélite-Receptor.

Thiago N. de Moraes, Alexandre B. V. Oliveira e F. Walter

Resumo — A principal fonte de erro na determinação da posição de um usuário do Sistema de Posicionamento Global (GPS) é, para o caso de receptores de uma só frequência, o efeito causado pela ionosfera no sinal transmitido pelos satélites. Para se minimizar esse erro é necessário conhecer o valor do Conteúdo Eletrônico Total (TEC) na linha de visada entre o satélite e o receptor. Com o objetivo de melhor compreender o comportamento da ionosfera, foram gerados mapas globais anuais mostrando o VTEC (Vertical TEC) em intervalos de duas horas. Através desses mapas pode-se analisar o comportamento global da ionosfera em períodos magneticamente perturbados (altos valores de índice K_p) e a relação com o fluxo solar e com o número de manchas solares. Analisando-se o comportamento global da ionosfera, pode-se analisar o efeito da Anomalia Ionosférica Equatorial (AIE) tanto sobre o Brasil (região de baixa latitude geomagnética), como também sobre os EUA, a Europa e o Japão (regiões de médias e altas latitudes geomagnéticas).

Palavras-Chave— Sistema de posicionamento global – GPS, ionosfera, Anomalia Equatorial, Satélite, Canal.

Abstract— The major source of error in the evaluation of the user position for single frequency GPS receivers is the effect caused by ionosphere on the satellite-transmitted signal. In order to reduce this error it is necessary to know the value of the slant total electron content between the satellite and the receiver. In order to achieve a better understanding of the ionosphere behavior, global annual maps showing the total electron content in intervals of two hours have been generated. Based on these maps periods of magnetic disturbance (high values of the K_p index) and the relation with the solar flux and sunspot number can be analyzed. It can be still studied the effect of the Equatorial Anomaly over Brazil (low geomagnetic latitude region) as well over USA, Europe, and Japan (high geomagnetic latitude regions).

Index Terms—Global Positioning System – GPS, ionosphere, Equatorial Anomaly, Satellite, Channel.

I. INTRODUÇÃO

Os principais erros do GPS são o erro de relógio do receptor, o erro da posição do satélite, o erro de multicaminho, os erros inerentes ao receptor e o erro devido à atmosfera (troposfera e ionosfera).

Thiago Nunes de Moraes, E-mail: thiago@ita.br.

Alexandre Boa Ventura Oliveira, E-mail: alexbvo@ita.br

Fernando Walter, E-mail: fw@ita.br.

Divisão de Engenharia Eletrônica, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos/SP, Brasil. Este trabalho foi financiado pelo Projeto CNS/ATM.

A pseudodistância (distância geométrica ou real entre o satélite e o receptor mais erros) é dada por:

$$\rho = r - c(\Delta b_s - \Delta b_u) + c(\tau_T + \tau_{ion} + \eta + \varepsilon) \quad (1)$$

Onde:

r : distância geométrica (sem os erros inerentes ao sistema);

Δb_s : erro do relógio do satélite;

Δb_u : erro do relógio do receptor;

τ_T : tempo de atraso devido à troposfera;

τ_{ion} : tempo de atraso devido à ionosfera;

η : erro devido ao ruído; e

ε : erro devido ao processamento e outros.

Na Tabela I são mostrados valores típicos destes erros em metros dentro de 1 sigma. Se o canal no qual se propaga o sinal GPS fosse o espaço livre o erro na determinação da posição do usuário seria bastante minimizado. Contudo o sinal GPS se propaga em um meio não homogêneo e variável com o tempo (troposfera e ionosfera), onde a velocidade de propagação varia.

TABELA I
Erros no sistema GPS

	Erros típicos (m, 1σ)
Ionosfera	7,0
Troposfera	0,7
Relógio e Efemérides	3,6
Receptor	1,5
Multicaminho	1,2
Erro Total na pseudodistância	14,0

A atmosfera é a região que envolve a Terra caracterizada pela presença de gases. A parte mais baixa da atmosfera, aproximadamente até 10 km (para latitudes médias), é caracterizada pelo decréscimo da temperatura com a altura sendo conhecida como troposfera. A região da atmosfera que se estende, aproximadamente, de 50 a 1000 km é conhecida como ionosfera. Esta região se encontra ionizada, resultado da liberação de elétrons de moléculas devidos principalmente à radiação de partículas, emissão de luz ultravioleta e raios X provenientes do Sol.

A ionosfera pode causar três efeitos primários sobre o sinal GPS: o primeiro é uma combinação de retardos de grupo e avanço de fase, o segundo é a cintilação que aparece em algumas latitudes nas quais a amplitude e a fase flutuam muito rapidamente e o terceiro é a refração [1].

Um parâmetro usado para o estudo da ionosfera é o seu conteúdo eletrônico (EC). O EC é a integral da densidade eletrônica ao longo do trajeto percorrido pelo sinal entre o satélite e o receptor [2]. Devido ao fato de que os satélites da constelação GPS estão bem acima da ionosfera, este parâmetro é denominado conteúdo eletrônico total (TEC). O TEC também varia no tempo e no espaço, pois é uma função da radiação solar, isto é, sendo afetado pelo número de manchas solares, estação do ano, localização do usuário e também do caminho percorrido entre o satélite e o receptor. Quando esta medida é projetada na vertical do ponto subionosférico é denominado de VTEC (Vertical TEC).

II. MAPAS DO VTEC

Para geração dos mapas do VTEC foram desenvolvidos aplicativos [4] que transformam os dados no formato IONEX em mapas em três (Figura 1) ou em duas (Figura 3) dimensões.

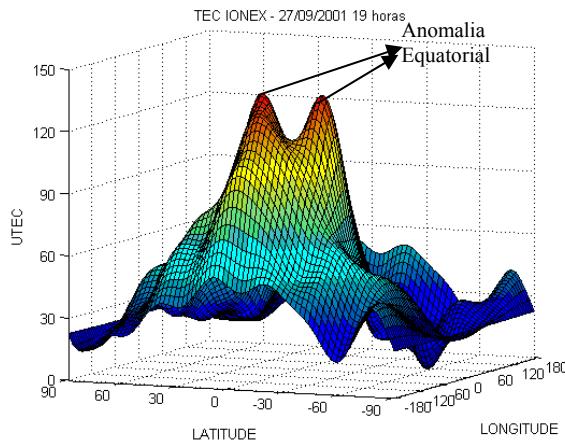


Fig. 1 –VTEC x Latitude x Longitude fornecido pelos dados no formato IONEX (27/09/2001) [3].

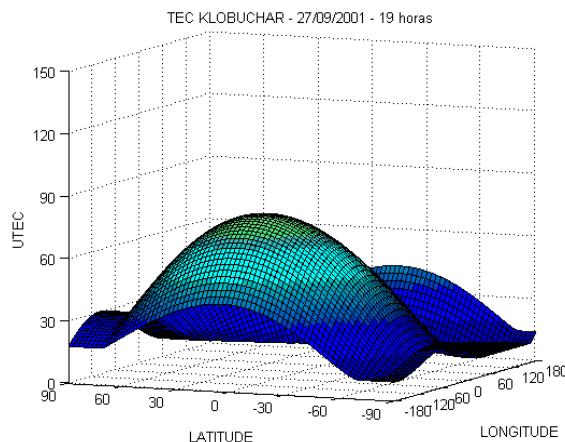


Fig. 2 –VTEC x Latitude x Longitude estimado pelo modelo Klobuchar (27/09/2001) [4].

O atraso devido à ionosfera pode superar o valor de 60 ns, o que corresponde a um erro de cerca de 18 m na distância, podendo chegar até a 100 m e como consequência a um erro grande na determinação da posição do usuário.

As regiões do globo terrestre que estão compreendidas entre, aproximadamente, -20° e $+20^{\circ}$ de latitude geomagnética possuem uma anomalia no comportamento da ionosfera (Figura 1) conhecida como Anomalia Ionosférica Equatorial (AIE). A AIE é causada pela ação combinada de campos elétricos e magnéticos consistindo de duas faixas de alta densidade do plasma ionosférico localizadas nas regiões tropicais que circulam paralelamente ao equador magnético [8]. Nas faixas da anomalia que se localizam no território brasileiro as densidades da ionosfera atingem valores maiores que em outras regiões da Terra. Devido à difusão dos elétrons e íons ao longo do campo magnético devido à ação da gravidade e de gradientes de pressão, há aparecimento de dois picos nas latitudes geomagnéticas de $\pm 20^{\circ}$ por volta das 14 horas local [5]. O modelo usado nos receptores de uma só freqüência (chamado de modelo Klobuchar) não leva em conta a AIE, como pode ser visto na Figura 2.

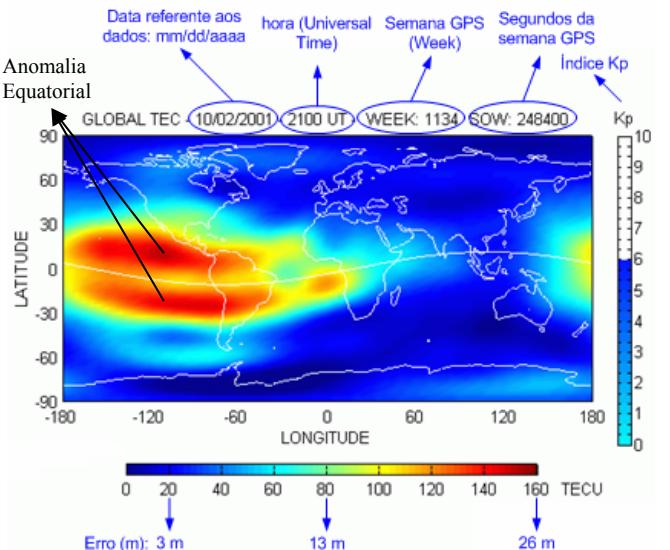


Fig. 3 – Mapa do VTEC (02/10/2001) usando dados no formato IONEX obtidos através do Serviço Internacional de GPS para Geodinâmica (IGS).

Informações sobre o VTEC, em escala global, podem ser obtidas através do Serviço Internacional de GPS para Geodinâmica (IGS), que também fornece dados de órbitas GPS precisas, coordenadas das estações da rede, informações sobre o relógio do satélite e atraso zenital troposférico.

Os dados coletados pelo IGS são apresentados em um formato padrão, proposto por Schaeer [6], denominado IONEX (Ionosphere map Exchange). São fornecidos dados de VTEC para latitudes com precisão de 2,5 graus e longitude com precisão de 5 graus. Isso equivale a uma grade formada de 71 linhas por 73 colunas, totalizando 5183 valores de VTEC ao redor do mundo. Esta figura também ilustra a AIE, caracterizada por picos de TEC em torno de $\pm 20^{\circ}$ de latitude geomagnética.

A. Cálculo do VTEC

O atraso devido à ionosfera (Δt_{ion}) é dado em função do TEC por:

$$\Delta t_{ion} = \frac{40,3}{cf^2} TEC \quad (2)$$

Sendo c a velocidade da luz no espaço livre, 299792458 m/s, e f a freqüência de transmissão do sinal (L_1 ou L_2).

Como o sinal é transmitido ao mesmo tempo (nas freqüências L_1 e L_2) e pelo mesmo satélite, admite-se que o caminho percorrido pelos dois sinais é praticamente o mesmo. Isto é, pode-se supor o TEC igual nas duas freqüências.

O TEC ao longo da linha de visada do satélite pode ser determinado por:

$$TEC = \frac{(\rho_{L2} - \rho_{L1})}{40,3} \frac{f_{L1}^2 f_{L2}^2}{(f_{L2}^2 - f_{L1}^2)} \quad (3)$$

Sendo ρ_{L1} e ρ_{L2} as pseudodistâncias medidas em L_1 e L_2 respectivamente. Como o TEC depende da posição do satélite relativo ao usuário e portanto de sua elevação, esta medida é denominada de *Slant TEC* e abreviada como *STEC*. É mais útil ter-se a medida do TEC na vertical (*VTEC*) pois estas poderiam ser usadas para qualquer elevação do satélite através de conversão de *VTEC* para *STEC*.

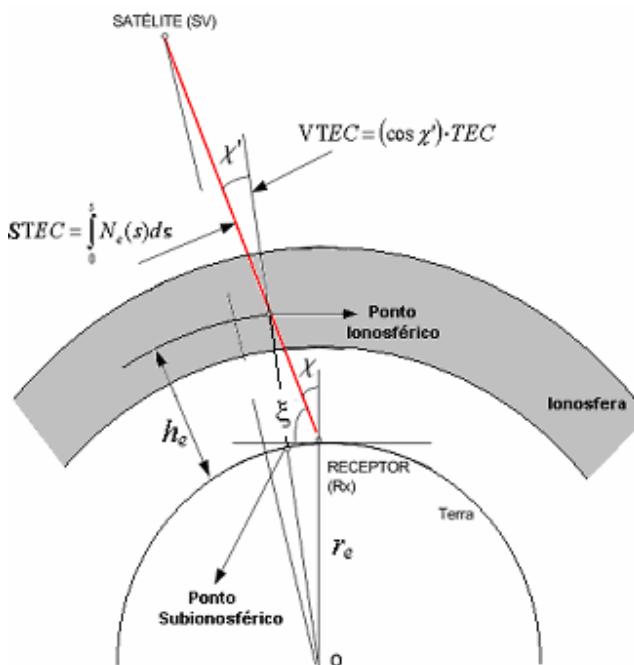


Fig. 4 – Conversão do *STEC*, na direção de percurso do sinal, para *VTEC*.

O *STEC* é convertido em *VTEC* pelas relações trigonométricas apresentadas na Figura 4Fig. 4, através da equação:

$$VTEC = \cos(x') \cdot STEC \quad (4)$$

Na equação (4), o valor de x' , representa ao ângulo do zênite do caminho do sinal em relação a uma calota de altitude média h_e , denominado ponto subionosférico, e é obtido da seguinte expressão [7]:

$$\sin x' = \frac{r_e}{r_e + h_e} \sin \chi, \quad (5)$$

onde r_e é o raio médio da Terra, h_e representa a altura média da ionosfera e χ é o ângulo do zênite do satélite na estação de observação. O valor de h_e varia de acordo com a hora do dia, estação do ano e atividade solar entre 300 km a 400 km (Ponto subionosférico).

B. Índices K_p , A_p , Fluxo Solar e Manchas Solares

Diariamente acontece a variação do campo geomagnético relacionada a forças eletromotivas e correntes produzidas pelo aquecimento solar da atmosfera superior [8]. Outras irregularidades que ocasionam as mudanças no campo magnético são provocadas por interação de partículas do vento solar com a magnetosfera e pela própria variação do campo geomagnético. Os índices K_p e A_p indicam a atividade geomagnética para descrever a variação do campo geomagnético.

O fluxo solar está relacionado com a intensidade de radiação solar no comprimento de onda de 10,7 cm que corresponde à freqüência de 2,8 GHz.

As manchas solares são áreas temporariamente perturbadas na fotosfera solar são caracterizadas por concentrarem um forte fluxo magnético, e são aparentemente escuras porque são mais frias que as áreas ao seu redor. São caracterizadas por concentrarem um forte fluxo magnético.

Ao analisar o comportamento do TEC, por quase cinco anos de dados, foi possível identificar os períodos com atividade geomagnética mais intensa (valores de índices K_p e/ou A_p mais elevados). Apesar de a AIE ser um fenômeno típico das regiões próximas ao equador geomagnético verificou-se que em determinados períodos magneticamente perturbados esta anomalia, além do hemisfério sul, se estende até parte dos territórios norte-americano, europeu e japonês.

C. Estudo do *VTEC* em períodos magneticamente perturbados

Nos meses de outubro a dezembro de 2003, a Terra foi atingida por uma seqüência de explosões solares classificadas como as maiores já registradas [9]. Estas explosões fizeram com que a radiação incidente na Terra aumentasse significativamente, afetando a operação de satélites artificiais ou mesmo danificando-os.

Através dos mapas do *VTEC* pode-se observar o efeito das tempestades magnéticas sobre a concentração de elétrons da ionosfera. Como pode ser observado na Figura 5, ocorre um pico de máximo no índice A_p no período de 29 a 30 de outubro de 2003, devido à seqüência de explosões solares do fim do mês. Este pico coincide com os picos do número de manchas solares e do fluxo solar.

A Figura 6 mostra o mapa do VTEC global no dia 29 de outubro de 2003. As explosões solares do fim de outubro fizeram com que altos valores de VTEC (~120 TECU) atingissem os EUA e o sul do Chile, caracterizando uma AIE intensificada.

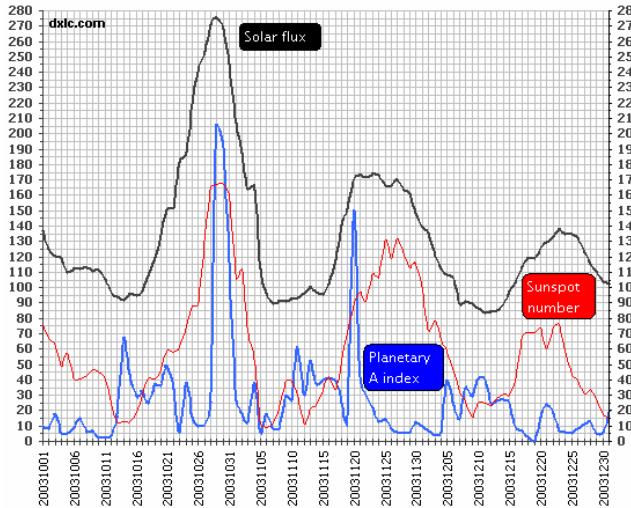


Fig. 5 – Fluxo Solar, Número de manchas solares e índice Planetário A para os meses de outubro a dezembro de 2003 [10].

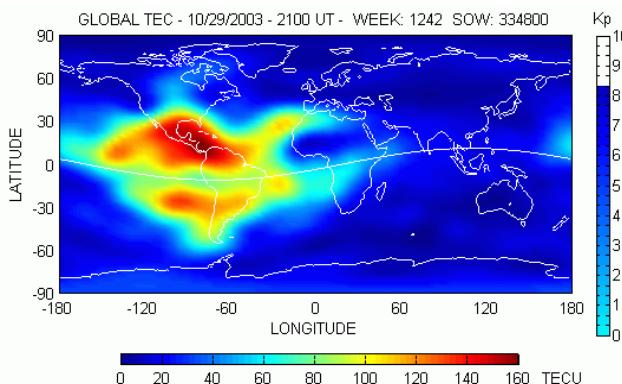


Fig. 6 – VTEC para o dia 29 de outubro de 2003 às 18:00 (Hora Local). Índice K_p ≈ 8.

A Figura 7 mostra o gráfico do VTEC durante todo o ano de 2003 sobre Palo Alto, Califórnia, EUA. Pode ser observado que no dia 29 de outubro ocorreu um pico no valor do VTEC (~180 TECU).

O gráfico da Figura 5 mostra um outro pico no valor do índice A_P no dia 20 de novembro de 2003. A Figura 8 mostra o mapa para o dia 20 de novembro de 2003 às 18:00 (Hora Local), apresentando altos valores de VTEC (~160 TECU) sobre a América Central e uma AIE acentuada.

Analizando-se os meses de outubro a dezembro de 2001, através do gráfico da Figura 9, observa-se um pico mais elevado no valor do índice A_P para o dia 6 de novembro. O mapa do VTEC global que corresponde a este período é mostrado na Figura 10. Pode-se observar que o VTEC sobre o Japão chega a aproximadamente 120 UTEC, que corresponde ao pico mostrado na Figura 11 (VTEC anual para Tóquio).

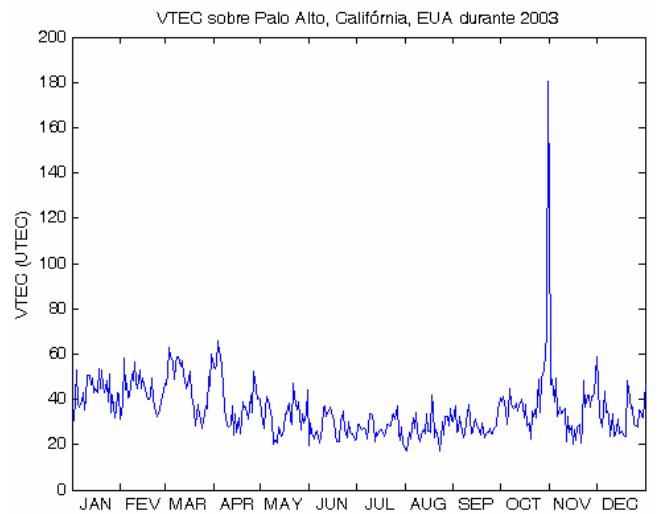


Fig. 7 – VTEC sobre Palo Alto, CA, EUA, durante 2003. Observa-se um pico no valor do VTEC para o dia 29 de outubro.

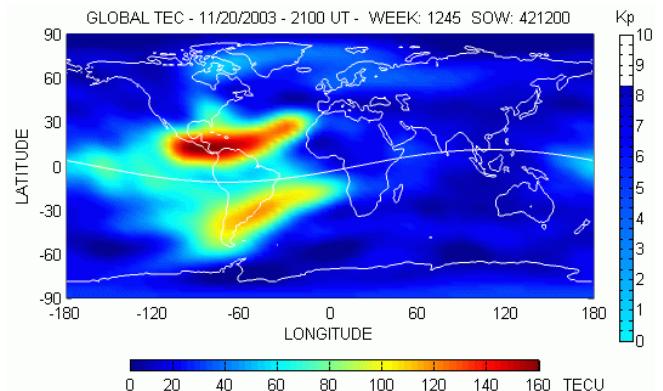


Fig. 8 – VTEC para o dia 20 de novembro de 2003 às 18:00 (Hora Local). Índice K_p ≈ 8.

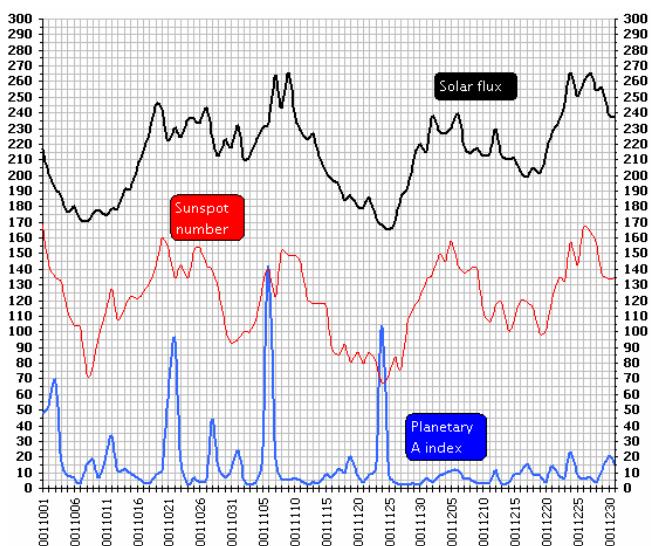


Fig. 9 – Fluxo Solar, Número de manchas solares e índice Planetário A_P para os meses de outubro a dezembro de 2001 [10].

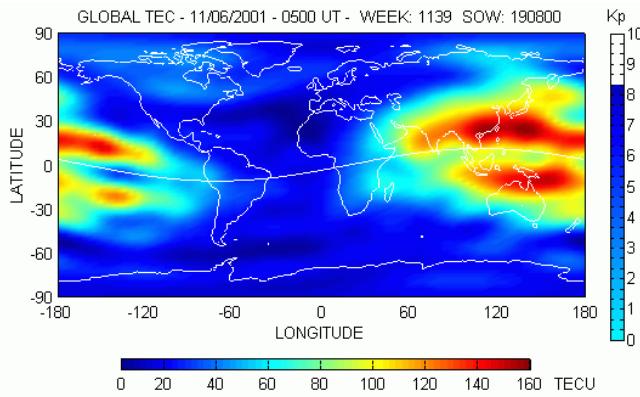


Fig. 10 – Valores elevados de VTEC sobre o Japão (~120 TECU).

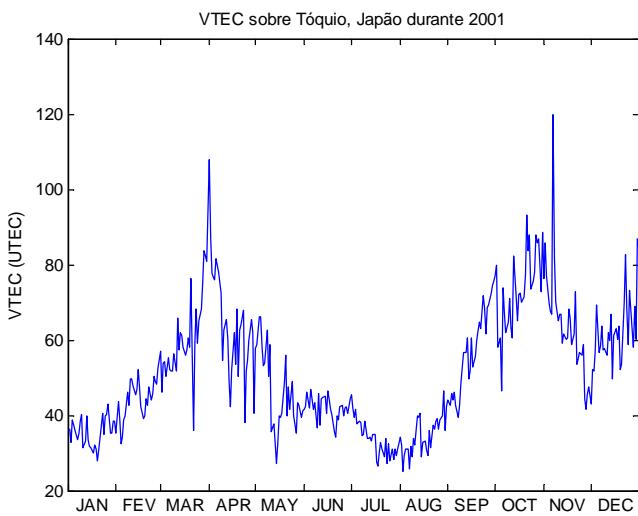


Fig. 11 – VTEC sobre Tóquio, Japão, durante 2001. Observa-se um pico no valor do VTEC para o dia 6 de novembro.

A Figura 12 mostra o mapa do VTEC global para o dia 28 de outubro de 2001. Pode-se observar que altos valores de VTEC (~120) atingem o sul da Europa. O gráfico da Figura 13 mostra o perfil do VTEC para o ano de 2001 sobre Roma, Itália, em que o pico no valor do VTEC acontece no dia 28 de outubro de 2001.

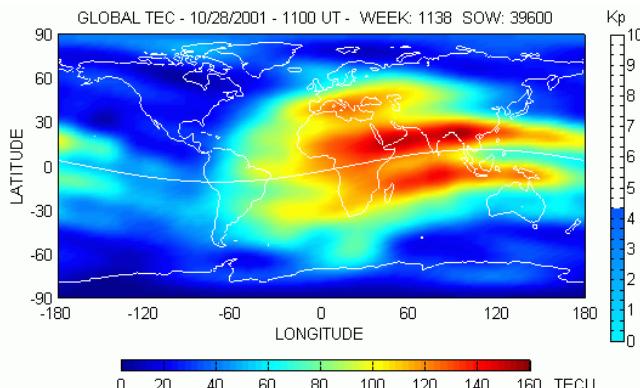


Fig. 12 – Valores elevados de VTEC sobre a Europa.

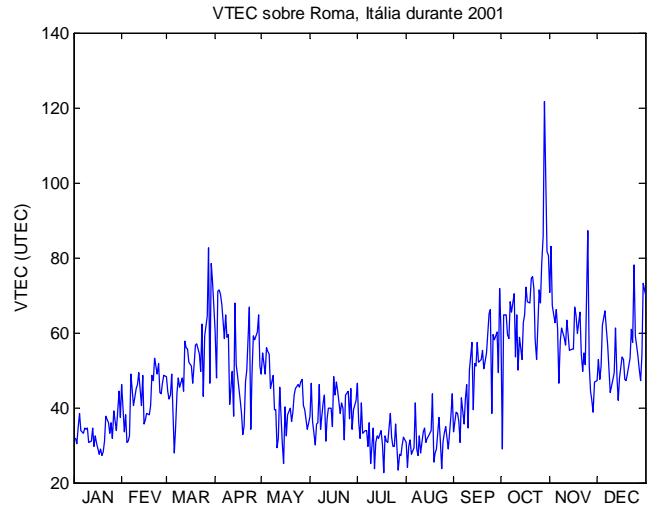


Fig. 13 – VTEC sobre Roma, Itália, durante 2001. Observa-se um pico no valor do VTEC para o dia 28 de outubro.

III. CONCLUSÕES

O desenvolvimento deste trabalho proporcionou a geração de mapas do VTEC desde janeiro de 1999 usando dados no formato IONEX. O valor do índice K_p adicionado ao lado de cada mapa permite relacionar o comportamento da ionosfera com o nível de atividade geomagnética (períodos magneticamente perturbados).

Pode-se analisar rapidamente em dias, horários e locais específicos (através de gráficos da variação anual do VTEC) o comportamento da ionosfera. Da mesma forma pode-se fazer comparações, usando os mapas do VTEC, com modelos que estimam o valor do VTEC da ionosfera, como por exemplo o modelo Klobuchar [11], ou ainda com novos modelos propostos. Pode-se também fazer comparações com o fluxo solar e com o número de manchas solares durante o período analisado (desde 1999).

Observou-se que apesar da Anomalia Equatorial ser um fenômeno típico das regiões próximas ao equador geomagnético, em determinados períodos magneticamente perturbados esta anomalia, além do hemisfério sul, se estende até parte dos territórios norte-americano, europeu e japonês.

Os valores de VTEC associados ao índice K_p estão sendo usados para modelar a variação da densidade eletrônica da ionosfera em função da altura, da latitude e da longitude num programa de traçado de raios em 3D [12]. Estes dados estão sendo utilizados para teste de previsão de dados VTEC através, por exemplo, de redes neurais. Outro objetivo é o desenvolvimento de modelos ionosféricos mais adequados para a AIE, visando reduzir o erro devido à ionosfera nessas regiões.

AGRADECIMENTOS

À International Civil Aviation Organization sob a concessão ICAO/BRA 006/802 que tem apoiado estas pesquisas no ITA. A.B.V.O. e T.N.M. têm bolsa do Programa CNS/ATM sob o Projeto “Formação de Recursos Humanos e Pesquisa para Aviação Civil”, CTA/DECEA. Os autores

também agradecem os revisores pelas sugestões dadas e incorporadas ao trabalho.

REFERÊNCIAS

- [1] Mendez, D.R.: Simulação e estratégia do receptor por software para GPS. 129f. 2002. Tese (Mestrado em Ciências), Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.
- [2] Mendonça, F. de; Muzzio, J.L.R.; and Walter, F.: *Second order correction electron content measurements with Faraday rotation*, Segundo Simpósio de Aeronomia Equatorial, INPE, São José dos Campos, SP, set. 1965.
- [3] Oliveira, A.B.V.; Morais, T.N.; and Walter, F.: *Effects of Equatorial Anomaly in the GPS Signals*, ION-GNSS-2003, Portland, OR, 9-11 set., 2003.
- [4] Oliveira, A.B.V.: *Uso do GPS para o Estudo da Anomalia Equatorial*. 167f, 2003. Tese (Mestrado em Ciências), Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.
- [5] Kennewell, J; Wilkinson, P.: Radio propagação transequatorial. Sydney : IPS Radio & Space Services, Australia, 1991. Disponível em <http://www.stabile.eng.br/tubes/mad_links/tep/radiotep.html>. Acesso em 15 de dezembro de 2003.
- [6] Schaer, S.; *Proposal Concerning VTEC Data Format*. GPS-IONO mail, February 6, 1996.
- [7] Hofmann-Wellenhof, B.; Lichtenegger, H.; Collins, J. GPS theory and practice. 3 ed. 355f. Wien: Spring-Verlag, 1994.
- [8] Rishbeth, H.; Garriott, O.K.: Introduction to Ionospheric Physics. New York. International Geophysics Series, 1969. (pp. 182-187).
- [9] NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration, U.S. Department of Commerce. Disponível em <<http://www.noaa.gov>>. Acesso em 5 de abril de 2004.
- [10] Disponível em <<http://www.dxl.com/solar/history/hist2003.html>>. Acesso em 5 de abril de 2004.
- [11] Klobuchar, J.A.: *Ionospheric Effects on GPS*. Hanscom Air Force Base, Massachusetts, 1996.
- [12] Morais, T.N.; Oliveira, A.B.V.; and Walter, F.: *Global Behavior of Equatorial Anomaly since 1999 and Effects on GPS Signals*. 11th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, 24-26 de maio de 2004, St. Petersburg, Russia.