



Correntes induzidas geomagneticamente em uma linha de transmissão brasileira: Resultados preliminares

Camila Silva de Lima^{1,2}, Cleiton da Silva Barbosa¹, Gelvam André Hartmann¹, Andrés Reinaldo Rodriguez Papa¹

¹Observatório Nacional, Rio de Janeiro

²Departamento de Geologia, Universidade Federal Fluminense, Niterói, Rio de Janeiro

Copyright 2015, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 14th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, August 3-6, 2015.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 14th International Congress of the Brazilian Geophysical Society and do not necessarily represent any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of the Brazilian Geophysical Society is prohibited.

Abstract

Geomagnetic field variations can induce electric currents at the Earth's surface. Although this phenomenon is more intense and frequent in high-latitude regions, recent studies have shown that transmission lines located in low- and mid-latitude regions may also be subject to this type of problem. In this work are presented preliminary results of geomagnetic induced currents (GIC) in the Itumbiara-São Simão transmission line, Minas Gerais State. GIC were determined from a numerical model based on the theory of plane wave and using a geoelectric resistivity model 1D of one layer and geomagnetic field data from the Vassouras Magnetic Observatory, Rio de Janeiro State. GIC were computed for four main magnetic storms observed during the solar cycle 23. Results suggest that the GIC is an important phenomenon that can affect the power transmission system in Brazil.

Introdução

As tempestades magnéticas são caracterizadas por fortes variações de intensidade e direção do campo geomagnético devido, principalmente, à atividade solar. Uma tempestade magnética começa com um aumento súbito do campo seguido de uma forte queda e depois uma fase de recuperação (e.g. Chapman e Bartels, 1940). Esse fenômeno natural segue estatisticamente o ciclo de manchas solares de 11 anos, mas grandes tempestades podem ocorrer durante o mínimo das manchas solares (Pirjola, 2002). Segundo a Lei de Faraday uma variação temporal do campo magnético gera um campo elétrico. Assim, quando ocorre uma tempestade magnética um campo elétrico é induzido na superfície terrestre. Esse campo elétrico induzido, chamado de campo geoeletrico, pode induzir correntes elétricas em condutores, como linhas de transmissão, gasodutos e oleodutos. A corrente elétrica induzida em materiais condutores e gerada por variações do campo magnético é chamada de corrente induzida

geomagneticamente (geomagnetically induced currents, GIC). Os fatores que afetam as GIC são: (a) fortes variações do campo magnético, ou seja, quanto maior for a tempestade magnética, maior será a GIC; (b) a resistividade do solo que, em geral, quanto mais resistivo for o solo maior será a GIC, e (c) a tensão da linha, isto é, linhas de alta tensão têm menor valor de resistência por comprimento, sendo assim maior é a corrente induzida. Devido ao fato das tempestades magnéticas serem mais intensas em regiões de altas latitudes, as GIC foram inicialmente estudadas e monitoradas nessas regiões (ver, por exemplo, os trabalhos de Boteler et al., 1994; Bolduc, 2002; Kappenman, 2005; Pirjola, 2005; Pulkkinen et al., 2003, 2005; Eroshenko et al., 2010). Assim, apesar desse fenômeno ser mais intenso e frequente em regiões de altas latitudes, estudos recentes têm mostrado que linhas de transmissão situadas em regiões de baixa e média latitudes também podem estar sujeitas a problemas devido à ocorrência de GIC. Um exemplo disso é a GIC medida por Trivedi et al. (2007) nas linhas "Itumbiara-São Simão" (IS) e "Pimenta-Barreiro" (PB) durante a tempestade magnética ocorrida em Novembro de 2004, cuja GIC alcançou um pico de 15 Ampères. Outros exemplos de GIC ocorreram no Uruguai (Caraballo et al., 2013), África do Sul (Ngwira et al., 2008) e China (Liu et al., 2009) e também apresentaram valores significativos de GIC.

A completa caracterização e a modelagem de GIC em baixas e médias latitudes ainda demandam maiores estudos. No Brasil, a modelagem de GIC é latente sob diversos aspectos. Fatores como a complexa malha de linhas de transmissão brasileira exige uma série de precauções porque todo o sistema de transmissão é interligado e, dependendo das intensidades das GIC, podem ocorrer problemas, como os famigerados "apagões". Além disso, a presença de fontes anômalas do campo geomagnético na América do Sul, como a Anomalia Magnética do Atlântico Sul (AMAS), também é um fator pouco compreendido sob o ponto de vista de variações do campo geomagnético externo e sua influência sob os problemas de indução eletromagnética em superfície. Neste trabalho serão apresentados resultados preliminares de modelagem numérica de GIC na subestação da linha de Itumbiara, Minas Gerais, para as quatro tempestades magnéticas de maior amplitude observadas durante o ciclo solar 23.

Dados e Métodos

Para a realização da modelagem numérica de GIC são necessários três conjuntos de dados: (a) dados geomagnéticos, (b) dados de resistividade das camadas de solo e (c) dados da subestação e da linha Itumbiara-São Simão (e.g. voltagem da linha, resistência de aterramento, etc.).

Os dados geomagnéticos provêm do Observatório Magnético de Vassouras (VSS) e compreendem os dados das componentes magnéticas H e D para os anos anteriores a 2004 e X e Y para os anos seguintes em resolução de 1 minuto. A Tabela 1 mostra as datas das amplitudes máximas observadas nessas tempestades, bem como os respectivos valores de DST (Disturbance Storm Time Index).

Tabela 1: Datas das amplitudes máximas das tempestades magnéticas, os respectivos valores de DST e de GIC observadas.

Data da amplitude máxima da tempestade	DST (nT)	Máxima amplitude das GIC (A)
16/07/2000	- 301	~ 10
31/03/2001	- 307	~ 4.8
30/10/2003	- 401	~ 10
08/11/2004	- 373	~ 4

Os dados de resistividade usados para o modelo numérico de GIC são aqueles determinados por Bologna et al. (2001). A Tabela 2 mostra as espessuras de cada camada e os respectivos dados de resistividade usados no modelo.

Tabela 2: Espessuras das camadas e os respectivos valores de resistividade usados no modelo numérico.

Espessura (km)	Resistividade ($\Omega.m$)
0-4	2×10^2
4-11	1×10^5
11-21	6×10^2
>21	1×10^4

A linha de transmissão em estudo está localizada entre as latitudes 19°S e 18.4°S e longitudes 50.5°W e 49.1°W (Figura 1), e sua extensão total é de 150 km. A voltagem da linha IS é 500kV e a resistência total 3 Ω .

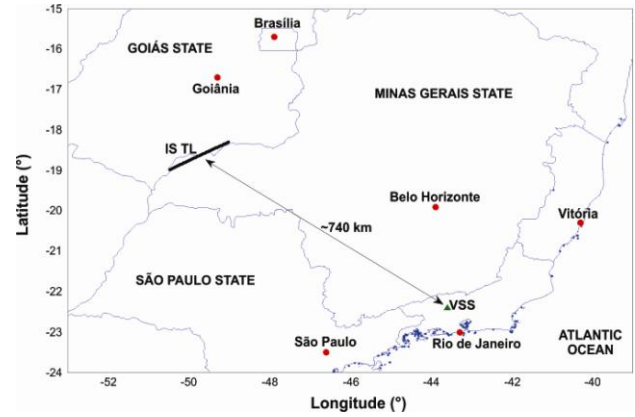


Figura 1: Mapa de localização da linha de transmissão Itumbiara-São Simão (IS TL) e a respectiva distância do observatório magnético de Vassouras (VSS). Figura modificada de Barbosa et al. (2015).

A modelagem numérica de GIC segue duas etapas, conforme proposto por Pirjola (1982): (a) cálculo do campo geoeletrico e (b) cálculo da corrente elétrica na subestação de estudo.

Para efetuar o cálculo do campo geoeletrico, utiliza-se o modelo de onda plana no sistema de coordenadas cartesianas, assumindo-se que os campos elétrico e magnético são ondas planas que se propagam em direção à superfície da Terra (z). Inicialmente, considera-se a subsuperfície como um semi-espaço homogêneo de condutividade σ , de maneira que pode-se expressar o campo eletromagnético por meio das equações de Maxwell da forma a seguir:

$$E_x = C e^{-kz} + D e^{kz} \quad (1),$$

$$B_y = \frac{k}{i\omega} C e^{-kz} + D e^{kz} \quad (2),$$

e,

$$k^2 = i\omega\mu_0\sigma \quad (3),$$

onde E_x e B_y são os campos elétrico e magnético no domínio da frequência, respectivamente; a componente x indica a direção norte e a componente y indica a direção leste. O μ_0 é a permeabilidade magnética no vácuo, ω é a frequência e C e D são constantes. Quando o z tende ao infinito, D deverá ser zero, sendo assim será uma solução finita. Neste caso:

$$E_x = C e^{-kz} \quad (4),$$

$$B_y = \frac{k}{i\omega} C e^{-kz} \quad (5).$$

A impedância Z é definida como:

$$Z = \mu_0 \frac{E_x}{B_y} \quad (6),$$

e para o caso de um semi-espço homogêneo e infinito:

$$Z' = \sqrt{\frac{i\omega\mu_0}{\sigma}} \quad (7).$$

Então, pode-se escrever as componentes do campo geoeétrico:

$$E_x = \frac{Z'B_y}{\mu_0} \quad (8),$$

$$E_y = -\frac{Z'B_x}{\mu_0} \quad (9).$$

Considerando uma superfície dividida em N camadas planas paralelas indexadas pelo índice m de condutividade σ_m e pela espessura h_m , o campo eletromagnético pode ser calculado à partir das equações de Maxwell no domínio da frequência.

$$E_{m,x} = C_m e^{-k_m z} + D_m e^{k_m z} \quad (10),$$

$$B_{m,y} = \frac{k_m}{i\omega} (C_m e^{-k_m z} + D_m e^{k_m z}) \quad (11),$$

$$k_m^2 = i\omega\mu_0\sigma_m \quad (12),$$

A impedância na camada m é definida como:

$$Z_m = \mu_0 \frac{E_{m,x}}{B_{m,y}} \quad (13).$$

A partir das equações (10), (11) e (13), a impedância no topo da camada m pode ser expressa da seguinte forma (Zou e Liu, 2010):

$$Z_m = Z_{0m} \frac{1 + \beta}{1 - \beta} \quad (14),$$

$$\beta = \frac{Z_{m+1} - Z_{0m}}{Z_{m+1} + Z_{0m}} e^{-2k_m h_m} \quad (15),$$

e,

$$Z_{0m} = \frac{i\omega\mu_0}{k_m} = \sqrt{\frac{i\omega\mu_0}{\sigma_m}} \quad (16),$$

onde Z_m é a impedância do topo da camada M e Z_{m+1} é a impedância na camada abaixo dessa camada e h_m , é o tamanho da camada M. O objetivo é calcular o campo geoeétrico na superfície, então, é necessário calcular a impedância na superfície. Para tanto, assume-se uma

camada infinita, a impedância da superfície (Z') é dada por Eq. (7). A Eq. (14) foi usada recursivamente para obtermos a impedância na superfície (Z_s). Desse modo, o campo geoeétrico é calculado em termos do campo geomagnético, ambos no domínio da frequência, por:

$$E_x = \frac{Z_s B_y}{\mu_0} \quad (17),$$

$$E_y = -\frac{Z_s B_x}{\mu_0} \quad (18).$$

Então, a transformada de Fourier inversa é aplicada para obter o campo geoeétrico no domínio do tempo. O campo irá criar uma diferença de potencial (ddp) ao longo de uma linha de transmissão entre as estações A e B, tal cálculo é dado por:

$$V_{AB} = \int_A^B E \cdot dl \quad (19).$$

Assumindo que o campo é uniforme ao longo da linha de transmissão, a Eq.(19) não depende do caminho:

$$V_{AB} = L_N E_x + L_E E_y \quad (20),$$

onde L_N e L_E são as dimensões nas direções norte e leste, respectivamente. Considerando a Terra como um elipsoide, elas podem ser calculadas através das seguintes expressões:

$$L_N = (111.133 - 0.56 \cos(2\theta)) \cdot \Delta lat \quad (21),$$

$$L_E = (111.5065 - 0.1872 \cos(2\theta)) \cdot \cos\theta \cdot \Delta long \quad (22),$$

onde θ é a latitude média de A e B, e Δlat é a diferença entre as latitudes de A e B. Considerando a resistência de aterramento nula, a GIC calculada na linha de transmissão, onde R é a resistência da linha, será:

$$GIC = \frac{V_{AB}}{R} \quad (23),$$

e a GIC em uma rede de energia (I_e) com N estações é calculada utilizando a metodologia desenvolvida por Lehtinen e Pirjola (1985):

$$I_e = (1 + Y_n Z_e)^{-1} J_e \quad (24),$$

onde 1 é a unidade da matriz identidade e Z_e ($N \times N$) é a matriz de impedância de aterramento definida por:

$$Z_{e,jj} = r_e \quad (25),$$

$$Z_{e,kj} = 0$$

onde r_e é a resistência de aterramento da estação j. Y_n é a matriz de admissão $N \times N$ dada por:

$$Y_{n,ii} = \sum_{i=1, m \neq i}^N \frac{1}{R_{n,im}} \quad (26),$$

$$Y_{e,im} = \frac{-1}{R_{n,im}}$$

onde $R_{n,im}$ é a resistência da linha de transmissão entre as estações i e m . A matriz coluna J_e aborda informações sobre a voltagem, e é definida por:

$$J_e = \sum_{i=1; i \neq e}^N \frac{V_{ie}}{R_{ie}} \quad (27),$$

onde V_{ie} é a voltagem definida pela equação (20) e R_{ie} é a resistência linear da linha de transmissão.

Resultados Preliminares

As GIC foram calculadas para as tempestades magnéticas de maior intensidade do ciclo solar 23 (Tabela 1) na linha de transmissão Itumbiara-São Simão. Para o cálculo das GIC foi utilizado a camada >21km do modelo de resistividade como sendo uma camada infinita e homogênea (Tabela 2).

Os resultados das GIC calculadas para as tempestades estudadas mostram valores máximos que variam de 4 a 10 A (Tabela 1). Além disso, não há uma relação clara entre os máximos das GIC e os máximos de DST. As Figuras 2, 3, 4 e 5 mostram os valores de GIC calculadas para cada uma das tempestades analisadas.

Os valores máximos de GIC para a tempestade de Novembro de 2004 apresentaram valores que foram bastante inferiores àqueles determinados por medidas diretas feitas por Trivedi et al. (2007). Resultados semelhantes foram encontrados por Ngwira et al. (2008) e Barbosa et al.(2015), que mostraram que na África do Sul e no Brasil, respectivamente, um modelo de resistividade do solo com várias camadas melhorou de maneira bastante significativa a modelagem de GIC em comparação com o modelo de resistividade de solo homogêneo.

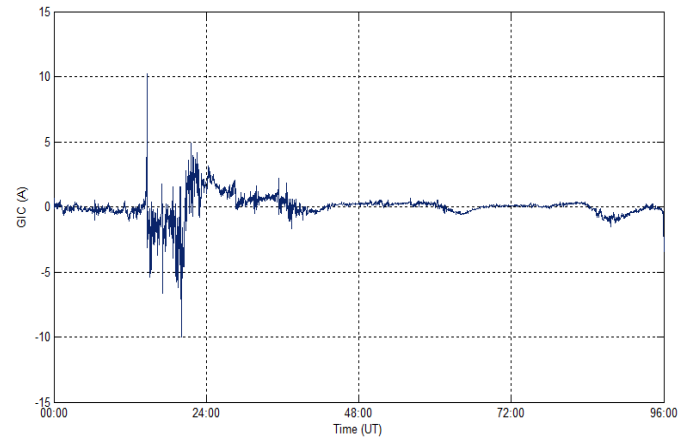


Figura 2: GIC calculada para os dias 15 a 18 de Julho de 2000.

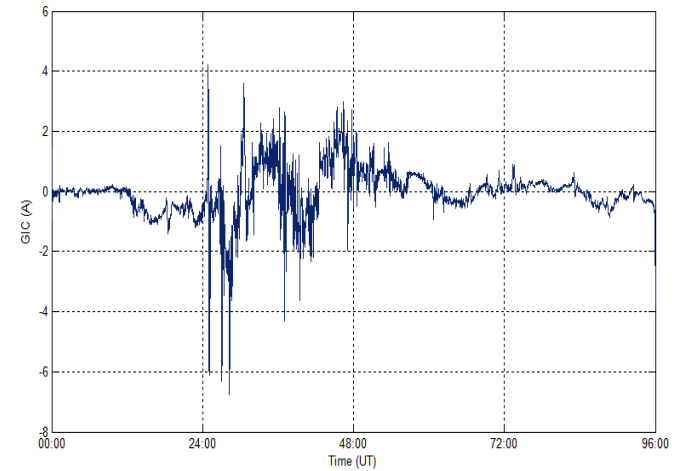


Figura 3: GIC calculada para os dias 29 de Fevereiro a 02 de Março de 2001.

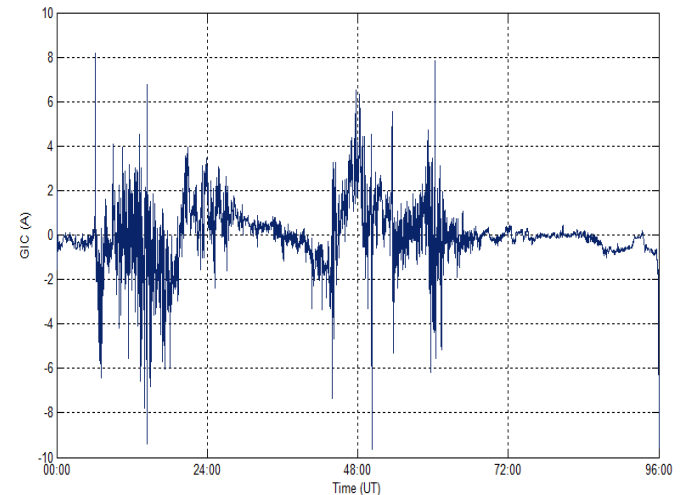


Figura 4: GIC calculada para os dias 29 de Outubro a 01 de Novembro de 2003.

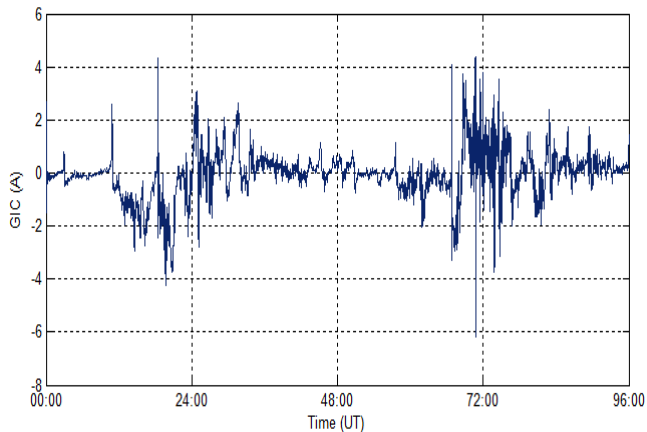


Figura 5: GIC calculada para os dias 07 a 10 de Novembro de 2004.

Conclusões

Os resultados para as tempestades de maior amplitude do ciclo solar 23 sugerem que GIC podem ocorrer em regiões de baixas latitudes, como no presente caso. No entanto, a modelagem de camada homogênea e infinita não representa de maneira adequada as GIC medidas diretamente na linha de transmissão Itumbiara-São Simão. Isto indica que o modelo de resistividade de 1 camada não representa de maneira adequada o campo geoeletrico produzido por tempestades magnéticas, pelo menos na região de Itumbiara-São Simão. Dessa forma, um modelo de várias camadas será aplicado para recalculas as GIC para as tempestades analisadas. Pretende-se que a utilização de um modelo de resistividade mais detalhado possa fornecer valores de GIC mais próximo dos valores esperados pelas medidas diretas.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq e CAPES pelas bolsas de estudo e pelo apoio financeiro e, ao Observatório Nacional, pelo apoio institucional.

Referências

- Barbosa, C.S., Hartmann, G.A., Pinheiro K.J., 2015 Numerical modeling of geomagnetically induced currents in a Brazilian transmission line. *Adv. Space Res.*, 55, 4, 1168-1179. doi: 10.1016/j.asr.2014.11.008
- Bologna, M.S., Padilha, A.L., Vitorello, I., 2001. Geophysical signature of the deep lithosphere underlying the Alto Paranaíba igneous province: constraining upper mantle properties. *Rev. Bras. Geocienc.*, 31, 471-474.
- Boteler, D.H., 1994. Geomagnetically induced currents: Present knowledge and future research. *IEEE*

Transactions on Power Delivery 9, 50-58. doi: 10.1109/61.277679

Caraballo, R., Bettucci, L.S., Tancredi, G., 2013. Geomagnetically induced currents in the Uruguayan high-voltage power grid. *Geophys. J. Int.* 195, 844-853. doi: 10.1093/gji/ggt293

Chapman, S., Bartels, J., 1940, *Geomagnetism*, Oxford, vol. II, 934 pp.

Eroshenko, E.A., Belov, A.V., Boteler, D., Gaidash, S.P., Lobkov, S.L., Pirjola, R., Trichtchenko, L., 2010. Effects of strong geomagnetic storms on Northern railways in Russia. *Adv. Space Res.*, 46, 1102-1110. doi: 10.1016/j.asr.2010.05.017

Kappenman, J.G., 2005. An overview of the impulsive geomagnetic field disturbances and power grid impacts associated with the violent Sun-Earth connection events of 29-31 October 2003 and a comparative evaluation with other contemporary storms, *Space Weather*, 3, S08C01, doi: 10.1029/2004SW000128

Lehtinen, M., Pirjola, R., 1985. Currents produced in earthed conductor networks by geomagnetically induced electric fields. *Ann. Geophys.* 3, 479-484.

Liu, C.M., Liu, L.G., Pirjola, R., Wang, Z.Z., 2009. Calculation of geomagnetically induced currents in mid- to low-latitude power grids based on the plane wave method: a preliminary case study. *Space Weather*, 7, S04005. doi: 10.1029/2008SW000439

Ngwira, C.M., Pulkkinen, A., McKinnell, L.A., Cilliers, P.J., 2008. Improved modeling of geomagnetically induced currents in the South African power network. *Space Weather*, 6, S11004. doi: 10.1029/2008SW000408

Pirjola, R., 1982. Electromagnetic induction in the earth by a plane wave or by fields of line currents harmonic in time and space. *Geophysica*, 18, 1-161.

Pirjola, R., 2002. Review on the calculation of surface electric and magnetic fields and of geomagnetically induced currents in ground-based technological systems. *Surv. Geophys.*, 23, 71-90. doi: 10.1023/A:1014816009303

Pirjola, R., 2005. Effects of space weather on high-latitude ground systems. *Adv. Space Res.*, 36, 2231-2240. doi: 10.1016/j.asr.2003.04.074.

Trivedi, N.B., V

, M.B., Soares, M.P., Luz, G.S., Pinto, F.A., Pirjola, R., Viljanen, A., 2007. Geomagnetically induced currents in an electric power transmission system at low latitudes in Brazil: A case study. *Space Weather*, 5, S04004. doi: 10.1029/2006SW000282