



SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA

GCQ - 06
16 a 21 Outubro de 2005
Curitiba - Paraná

GRUPO XIII
GRUPO DE ESTUDO DE INTERFERÊNCIAS, COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA E QUALIDADE DE
ENERGIA - GCQ

SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DOS EFEITOS DAS CORRENTES GEOMAGNETICAMENTE INDUZIDAS
(GIC) EM LINHAS DE TRANSMISSÃO NA REGIÃO SUDESTE DO BRASIL

Alexandre Pinhel Soares* (1)	Nalin B. Trivedi (2)
Guilherme Sarcinelli Luz (1)	Ícaro Vitorello (3)
Salvatore Mantuano Filho (1)	Wanderli Kabata (3)
Fábio de Abreu Pinto (1)	Antônio L. Padilha (3)
José Antônio Fabiano Mendes (1)	Severino Dutra (3)
	Maria José Barbosa (3)

(1) Furnas Centrais Elétricas S.A

(2) Convênio FURNAS/FATEC (Fundação de Apoio à Tecnologia e Ciência)

(3) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE

RESUMO :

Esse trabalho apresenta a abordagem do convênio firmado entre FURNAS e o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) para o estudo do fenômeno conhecido por Corrente Geomagneticamente Induzida (GIC – Geomagnetically Induced Current) que pode afetar os sistemas de transmissão de energia elétrica no Brasil. Demonstra-se que a GIC pode ser estimada comparando-se as variações magnéticas de magnetômetros instalados abaixo das linhas de transmissão com as de outros magnetômetros instalados em locais distantes. Os resultados preliminares de medições obtidas durante a intensa atividade geomagnética de novembro de 2004 indicam que as GICs que possam a vir ocorrer no Brasil terão pequena magnitude. Tendo essas medições como parâmetros, estudou-se qualitativamente os efeitos do fenômeno em transformadores a partir de simulações em EMTP (Eletromagnetic Transients Program).

PALAVRAS-CHAVE :

Correntes Geomagneticamente Induzidas, Geofísica, tempestades geomagnéticas, linhas de transmissão, desempenho do sistema elétrico, EMTP.

1 - INTRODUÇÃO :

As variações geomagnéticas observadas na superfície terrestre são compostas por duas partes, uma delas gerada pelas correntes elétricas presentes na Ionosfera e na Magnetosfera e a outra gerada pelas correntes elétricas induzidas na terra sólida. Os campos geoeletricos variam em função das frequências e da taxa da variação do campo geomagnético e da distribuição da condutividade na crosta e manto terrestre. Durante as tempestades geomagnéticas, a magnitude das variações do campo magnético da terra é grande como também é grande a sua taxa de variação [1,2] chegando a algo entre 1000 a 2000 nT nas latitudes aurorais e entre 200 a 300 nT nas latitudes baixas e médias, caso do Brasil.

Dentre as conseqüências dessa dinâmica encontram-se as Correntes Geomagneticamente Induzidas (GIC) em sistemas tecnológicos (redes de transmissão de energia e comunicação, dutos metálicos para óleo e gás, etc). Esse fenômeno tem sido estudado nas regiões de altas latitudes do hemisfério norte porém há registros de

* Rua Real Grandeza 219 bloco E sala 109 - Rio de Janeiro - RJ - Brasil - CEP 22283-900 - (021) 2528-4049 – pinhel@furnas.com.br

ocorrência de GIC em linhas de transmissão (LTs) e transformadores em regiões de baixas e médias latitudes durante tempestades geomagnéticas [3].

Um projeto de cooperação entre FURNAS e o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) está sendo efetuado para avaliar os efeitos das GICs em sistemas de transmissão de energia elétrica no centro-oeste e sudeste brasileiro. O estudo contempla a determinação das GICs a partir da monitoração das variações geomagnéticas com magnetômetros operando em pontos abaixo das LTs e com sensores Hall instalados em transformadores. A distribuição da condutividade terrestre abaixo das LTs está sendo investigada com modelos que utilizam dados de sondagens magnetotélúricas [4].

Este artigo apresenta alguns resultados qualitativos sobre os efeitos das GICs em transformadores a partir de parâmetros obtidos com as primeiras medições realizadas no território brasileiro por ocasião das tempestades geomagnéticas ocorridas entre os dias 7 e 10 de novembro de 2004.

2 - INSTRUMENTAÇÃO E METODOLOGIA :

As GICs obtêm acesso às LTs através dos sistemas de aterramento dos neutros dos transformadores com arranjo em Y (figura 1) de forma que pretende-se detectá-las pelos campos magnéticos induzidos pelas LTs (através de magnetômetros) e diretamente nos neutros aterrados dos transformadores (através de amperímetros por efeito Hall).

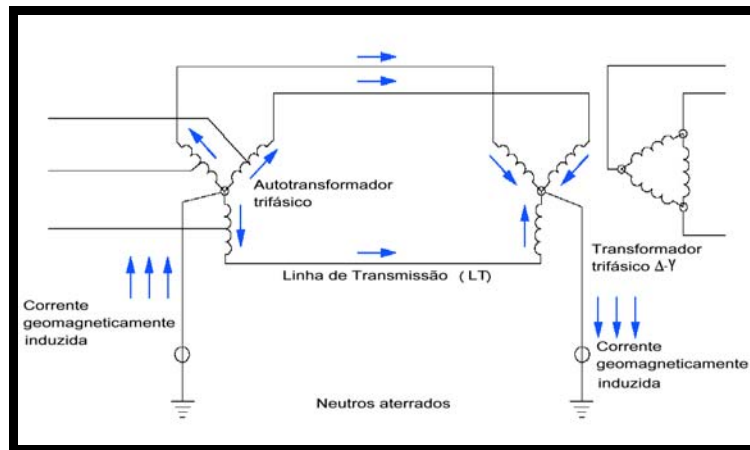


FIGURA 1 : Exemplo de esquema de circulação de GIC em um Sistema de Transmissão de Energia Elétrica.

O magnetômetro utilizado no campo (figura 2) opera com núcleo saturado (tipo fluxgate) e fica acomodado num tubo de PVC enterrado 50 cm abaixo do solo. Ele mede a intensidade de campo magnético nas duas componentes horizontais (Norte-Sul e Leste-Oeste magnético) e na componente vertical. A medida é feita a cada minuto e os dados são gravados em memória flash que é substituída periodicamente [5,6].

As variações magnéticas medidas abaixo das LTs são então comparadas com as registradas no Observatório Magnético de Vassouras. Tanto as componentes referentes à operação da LT (60Hz e harmônicos) quanto as referentes ao campo magnético da Terra são removidas, restando portanto os campos magnéticos relacionados a GICs. A partir desse resultado e pela distância entre o instrumento no solo e a LT, aplica-se a lei de Biot-Savart para o caso do campo magnético em um condutor infinito linear onde B é o campo magnético em Teslas (T), I é a corrente em Ampères (A), r é a distância em metros (m) do condutor ao instrumento de medição e μ é a permeabilidade magnética do ar ($\mu=400.\pi \text{ nH.m}^{-1}$) [7].

$$B(T) = \frac{\mu.I(A)}{2\pi.r(m)} \therefore I_{GIC}(A) = \frac{B(nT).r(m)}{200}$$

Os valores encontrados com essa abordagem serão comparados aos valores medidos nos transformadores pelos sensores Hall, quando estes forem instalados.



FIGURA 2 : Magnetômetro tipo fluxgate para instalação em posição vertical abaixo das LTs [5].

3 - SELEÇÃO DOS LOCAIS DE MEDIÇÃO :

A obtenção de resultados conclusivos a respeito da influência das GICs nos Sistemas de Transmissão de Energia Elétrica depende fortemente do sucesso na escolha dos locais de medição. Uma vez que o arranjo elétrico de transformadores mencionado é o utilizado em FURNAS, muitas foram as alternativas para investigação tendo havido necessidade de desenvolvimento de um critério de seleção para os locais de medição.

Primeiramente foram descartadas as LTs com capacitor série pois estes bloqueiam o fluxo da corrente uma vez que as GICs têm componentes de frequências muito baixas (quasi-DC).

Deu-se preferência às LTs com extensões maiores que 100 km uma vez que a magnitude das GICs está diretamente relacionada à distância entre as extremidades e linhas muito curtas poderiam dificultar as medições.

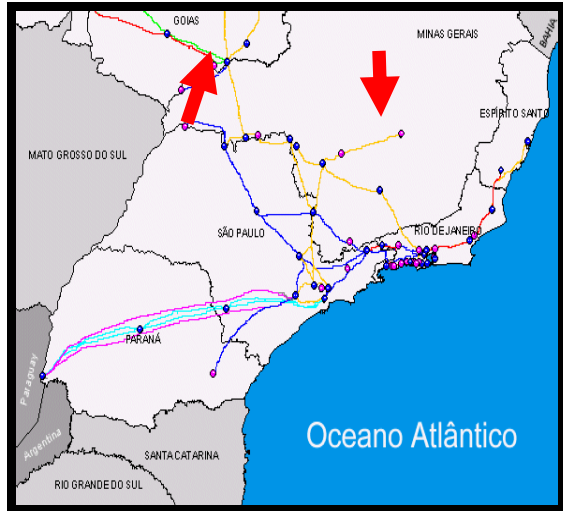
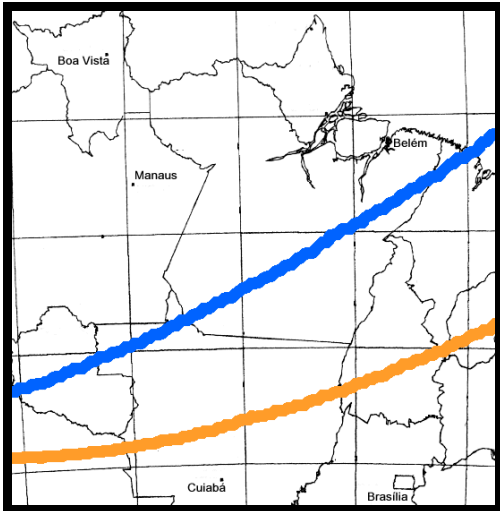
Por outro lado LTs com orientações próximas e paralelas ao Equador Magnético (local geográfico onde a componente vertical do campo magnético da Terra é zero) podem proporcionar mais condições para detecção de GICs, uma vez que são nessas geometrias que as variações do campo magnético da Terra são maiores (figura 3).

As GICs dependem também das características de condutividade elétrica do subsolo de forma que, para um estudo mais completo, deve ser estabelecida a distribuição de condutividade ao longo da LT, em profundidades de algumas centenas de quilômetros [1,2,3]. A obtenção desses dados é uma tarefa extensa e complexa que está sendo conduzida nas regiões de interesse. O INPE, porém, já tem levantamentos em várias regiões do Brasil, de forma que se considerou também, na escolha das primeiras LTs a serem estudadas, aquelas que percorressem regiões com perfis de condutividade já conhecidos e com alta resistividade em grandes profundidades.

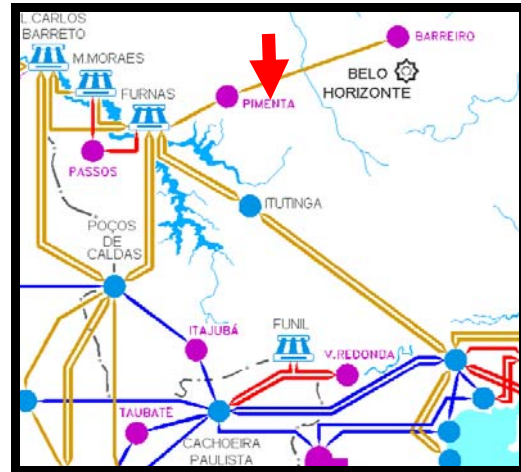
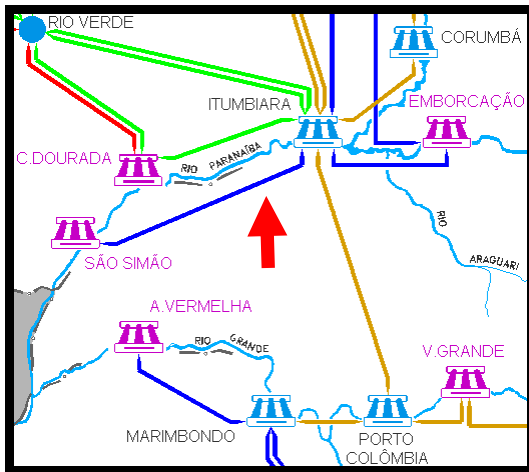
A partir desses critérios foram selecionadas 4 LTs (tabela 1), mas por problemas relativos a ruídos nos instrumentos somente foram obtidas medições confiáveis nas LTs Pimenta-Barreiro e Itumbiara-São Simão (figuras 4, 5 e 6) que ficam próximas à região oeste de Minas Gerais cujas características de condutividade já se encontram definidas (figuras 7 e 8) [4] e localizam-se a cerca de 300km e 700km do Observatório Magnético de Vassouras, respectivamente, sendo essas distâncias geofisicamente aceitáveis para efeito de comparação entre os registros dos campos geomagnéticos.

TABELA 1 : Relação das LTs monitoradas.

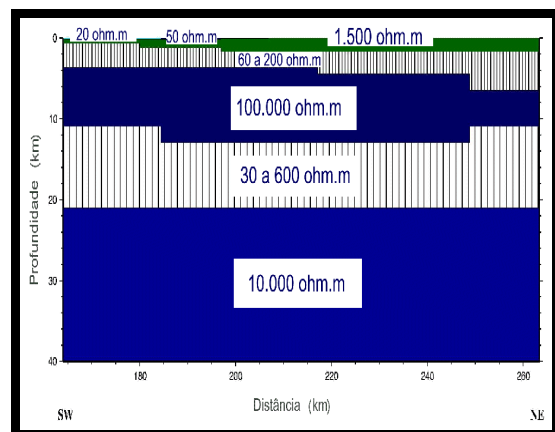
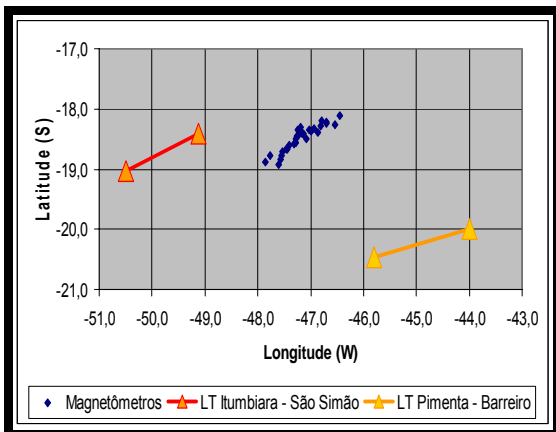
Linha	Tensão	Extensão	Estados
Araraquara-Poços de Caldas	500 kV	176 km	Minas Gerais e São Paulo
Furnas-Poços de Caldas	345 kV	131 km	Minas Gerais e São Paulo
Pimenta-Barreiro	345 kV	198 km	Minas Gerais
Itumbiara-São Simão	500 kV	166 km	Minas Gerais



FIGURAS 3 e 4 : Equador Magnético (esq). Em laranja a localização em 1957 e em azul a localização em 2000 (fonte : Observatório Nacional). Visão geral da região com setas indicando as LTs (dir).



FIGURAS 5 e 6 : Detalhes das LTs Itumbiara-São Simão (esq) e Pimenta-Barreiro (dir), com setas indicando a localização dos magnetômetros.



Figuras 7 e 8 : Pontos de sondagem de condutividade do solo da região oeste de Minas Gerais [4], próxima às LTs estudadas (esq) com respectivo perfil de condutividade da crosta (dir).

Para o posicionamento dos magnetômetros ao longo das LTs foram definidas regiões distanciadas de pelo menos 5 km das subestações (SEs), visando reduzir possíveis interferências eletromagnéticas, porém sem perder as facilidades proporcionadas pelas infra-estruturas dessas instalações.

Como os magnetômetros ficam posicionados imediatamente sob as LTs a uma profundidade de 50cm, selecionou-se locais onde os terrenos não são utilizados para agricultura. Dessa forma, reduziu-se o risco de interrupção das medições devido a intervenções inesperadas, uma vez que os instrumentos ficam sem assistência por longos períodos, havendo somente necessidade de eventuais substituições de baterias e coletas de dados após ocorrências de tempestades geomagnéticas.

4 - RESULTADOS PRELIMINARES :

Um dos índices utilizados nos estudos referentes à atividade geomagnética do planeta é o Kp (Índice Planetário - planetarische Kennziffer) que é obtido a cada três horas pela média dos níveis das duas componentes horizontais do campo magnético da Terra observadas em treze estações localizadas em altas latitudes, a maioria no Hemisfério Norte. Valores de Kp superiores a 4 indicam tempestades magnéticas como as ocorridas em novembro de 2004 (barras em vermelho na figura 9) e que proporcionaram condições para a primeira detecção de GIC em território brasileiro. A metodologia descrita foi aplicada aos dados desse período, resultando nos gráficos da figura 9, onde se podem notar perturbações em dois períodos distintos (em vermelho).

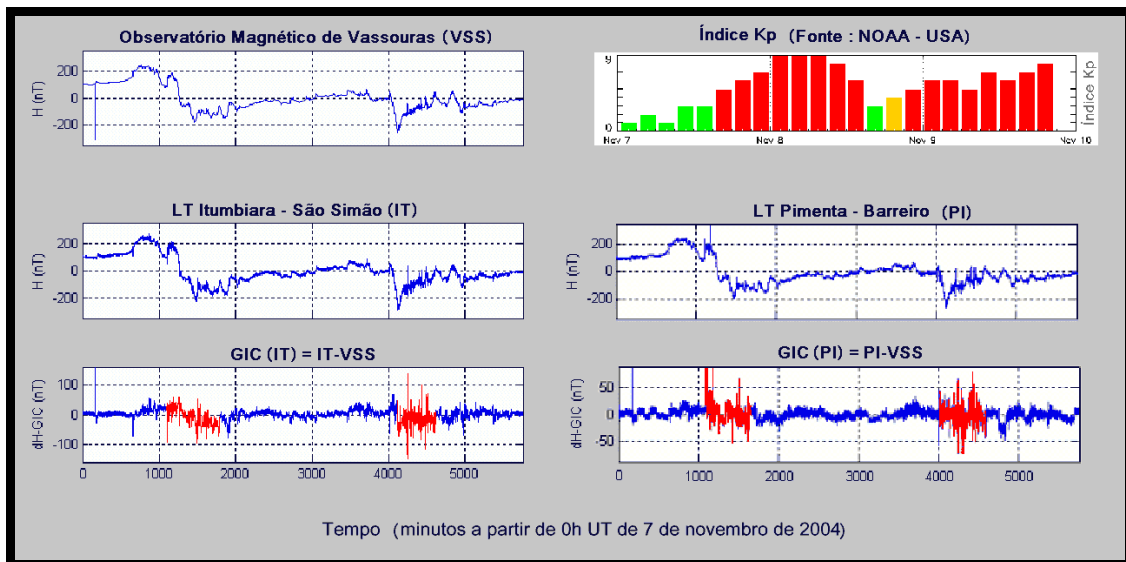


FIGURA 9 : Atividade geomagnética do período de 7 a 10 de novembro de 2004 e registros de ocorrência de GIC (em vermelho) nas LTs Itumbiara – São Simão e Pimenta-Barreiro.

Aplicando a lei de Biot-Savart e considerando uma distância máxima de 30m entre as LTs e os instrumentos e uma amplitude máxima de 100nT no campo, pode-se estimar que as correntes não foram superiores a 15A. A análise espectral indicou componentes entre 1 e 3mHz, porém deve-se ressaltar que as medições foram realizadas a cada minuto de forma que parte do espectro não pôde ser registrado. Deve-se ressaltar também que esse é um resultado preliminar que deve ainda ser validado por outras medições em vários outros locais.

Pesquisou-se em FURNAS, no período em questão, a existência de ocorrências de falhas no Sistema Elétrico que pudessem ter alguma correlação com os registros mencionados, porém nada foi encontrado.

As medições com magnetômetros foram iniciadas em agosto de 2004 e irão permanecer em curso até o final do convênio de pesquisa (2006), porém as medições nos neutros dos transformadores ainda não foram iniciadas pois os instrumentos estão em desenvolvimento.

5 - SIMULAÇÕES :

As simulações foram realizadas no programa ATP (Alternative Transients Program) e basearam-se nas medições realizadas. Deste modo, foram consideradas amplitudes máximas de 15A para as GICs nas LTs e, como as frequências foram da ordem de poucos miliHertz, este efeito foi representado por fontes de tensão DC.

Para analisar o comportamento das correntes em um transformador diante da aplicação de tensão DC foi realizado um ensaio utilizando-se o simulador em tempo real de FURNAS (RTDS - Real Time Digital Simulator)

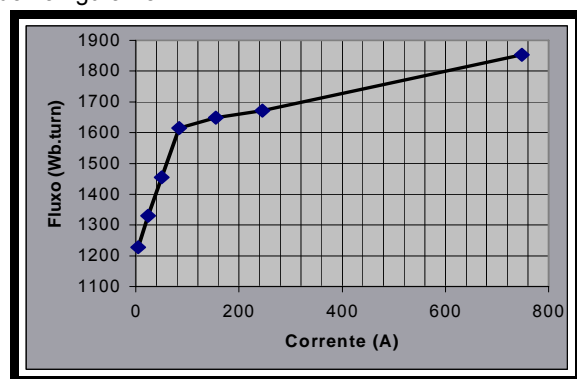
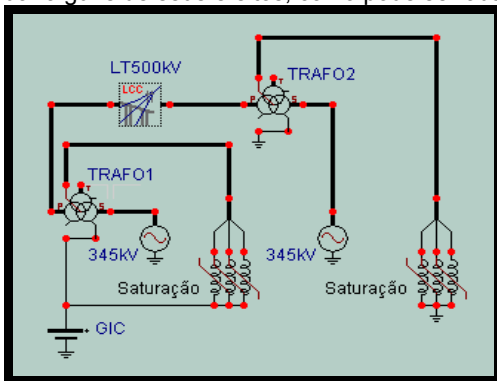
com amplificadores de tensão e corrente e um transformador (real) monofásico de 1kVA comparando-se os resultados com simulações no programa ATP. Embora não tenha sido possível reproduzir quantitativamente os mesmos resultados devido à imprecisão quanto às características magnéticas do transformador, a resposta qualitativa obtida encorajou a tentativa de reprodução do efeito das GICs em simulações neste programa.

Devido ao grande número de parâmetros a serem configurados no ATP e à grande diversidade de topologias de interesse, algumas considerações foram feitas para determinação de circuitos que fossem representativos do fenômeno em questão :

- A utilização de circuitos simplificados não consegue traduzir a complexidade topológica das redes reais pois em subestações pode haver muitos pontos de acesso para as GICs, o que por um lado reduz o efeito individual nos equipamentos, mas por outro fornece mais pontos de acesso remoto.
- A diferença de tensão produzida pela variação do campo magnético da Terra nos pontos de neutro das subestações não depende do número de caminhos de acesso sendo a corrente na linha uma função desta diferença de tensão entre as subestações, da impedância da linha e dos equipamentos na frequência do fenômeno e das resistências de aterramento das subestações.
- Não há como informar com precisão ao simulador os valores das resistências de aterramento das subestações (onde os neutros dos transformadores estão conectados) uma vez que esses valores dependem da resistividade do solo que são parâmetros difíceis de se obter, são aproximativos e variam com a umidade. Entretanto, para a simulação do valor da GIC na linha, esta resistência foi compensada pela tensão DC aplicada.
- Algumas características construtivas dos transformadores como quantidade de pernas, formato e material do núcleo (amorfo ou ferro-silício convencional, por exemplo), quantidade e arranjo dos enrolamentos e existência de entreferro influem fortemente na magnetização e, conseqüentemente, nos efeitos das GICs [8,9]. Para uma avaliação mais precisa destes efeitos seria necessário o conhecimento mais detalhado da curva de magnetização.
- Para determinação da diferença de potencial que causaria uma GIC de cerca de 15A utilizou-se as características resistivas para corrente contínua da LT Itumbiara – São Simão ($66\text{m}\Omega/\text{km} \times 166\text{km} \cong 11\Omega$). Por aproximação, a GIC passou a ser representada por uma fonte de tensão com 50V.c.c. e considerando as resistências associadas às subestações, a diferença de potencial não deve exceder 0.5V/km.
- O tempo de duração da presença da corrente contínua influi na magnetização do núcleo do transformador. As medições mostram que as GICs possuem duração de alguns minutos, mas por aspectos práticos referentes ao programa ATP, as simulações foram de até 150 segundos.

A figura 10 apresenta um dos circuitos básicos utilizados na simulação do fenômeno. A diferença de potencial causadora da GIC foi modelada no ponto de aterramento de um transformador em uma das extremidades da LT. Foram considerados os dados de um autotransformador 525/345/13.8kV cuja curva de saturação está apresentada na figura 11. Como exemplo de simulação modelou-se a LT de duas formas diferentes : uma onde buscou-se somente o efeito da GIC a partir da utilização de uma resistência de 11Ω e outra onde considerou-se os parâmetros variando com a frequência.

A figura 12 apresenta os efeitos da saturação produzidos pela GIC na corrente da LT a partir da modelagem adotada. Os pontos de descontinuidade devem-se a forma como foram modelados o aparecimento e o desaparecimento do fenômeno (degrau de tensão). Ao se considerar os parâmetros da LT variando com a frequência surge uma capacitância que produz uma corrente muito superior às produzidas pela saturação além de atenuar alguns de seus efeitos, como pode ser observado na figura 13.



FIGURAS 10 e 11 : Exemplo de circuito utilizado (esq) e curva de saturação (dir).

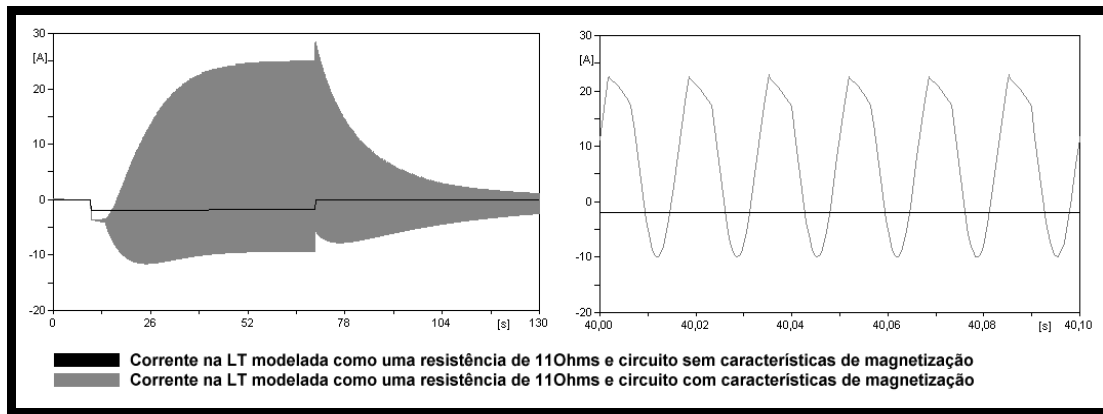


FIGURA 12 : Simulação do circuito da figura 10 com e sem as características de magnetização da figura 11.

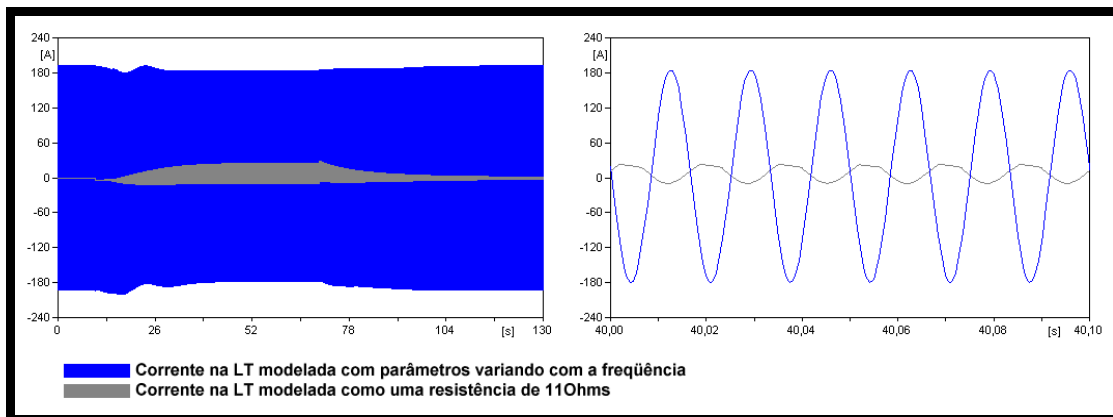


FIGURA 13 : Simulação do circuito da figura 10 com as características de magnetização da figura 11.

6 - CONCLUSÕES :

A metodologia de trabalho adotada pelo grupo de pesquisa FURNAS/INPE mostrou-se promissora e espera-se que, com as medições de corrente nos neutros dos transformadores, se consigam dados que venham corroborar os valores obtidos com os magnetômetros (GICs não superiores a 15A).

Alguns aspectos especulativos das simulações indicam que mais experimentos de medição devem ser efetuados, especialmente quanto ao comportamento térmico dos transformadores, ao aparecimento de harmônicos na rede e sobre a influência das variações das resistências de aterramento das malhas (devido à chuva, por exemplo) na distribuição das GICs nas LTs. Mas apesar das limitações encontradas conseguiu-se uma estimativa sobre a grandeza da diferença de potencial entre as extremidades de uma LT em território brasileiro ($\sim 0,5V/km$).

Do ponto de vista qualitativo pode-se afirmar que em situações onde há grande número de transformadores envolvidos os efeitos das GICs podem ser bem menos perceptíveis, uma vez que se formam divisores de corrente. Observou-se também que os efeitos das GICs são reduzidos quando se leva em consideração as características capacitivas das LTs.

Além dessas questões o trabalho deixou claro que para obtenção de resultados quantitativos práticos são muitos os aspectos a serem minuciosamente considerados o que faz parecer pertinente a realização de ensaios em transformadores de grande porte em presença de corrente contínua [10] e o estudo, desenvolvimento e implementação de modelos mais apropriados a transitórios de baixa frequência [11]. Estudos sobre os efeitos da presença de enrolamento terciário em delta nos transformadores [8] também devem ser realizados.

Apesar dos eventos geomagnéticos ocorridos entre 7 e 10 de novembro de 2004 estarem entre os maiores dos últimos 10 anos as medições e as simulações realizadas não indicam um cenário crítico quanto à estabilidade e confiabilidade do Sistema Elétrico. Essa impressão foi fortalecida pela não observância de distúrbios no Sistema

FURNAS nos dias em questão, porém entende-se que seria prematuro um parecer mais definido no momento. Por outro lado parecem indicados estudos relacionados à especificação de equipamentos, Engenharia de Manutenção (monitoração de temperatura em equipamentos) e Qualidade de Energia (monitoração de harmônicos).

Por fim cabe mencionar que as GICs não afetam somente os transformadores e que devem ser investigados também seus efeitos em outros equipamentos do Sistema Elétrico.

7 – AGRADECIMENTOS :

Os autores agradecem a Risto Pirjola [1,2] e Ari Viljanen [7] do Finnish Meteorological Institute (Geophysical Research Division, Helsinki, Finland) pela cooperação no desenvolvimento desse trabalho.

8 – REFERÊNCIAS :

[1] R. Pirjola, "Geomagnetically Induced Currents During Magnetic Storms", IEEE Trans. on Plasma Science, vol. 28, 2000.

[2] R. Pirjola, "Fundamentals about the flow of geomagnetically induced currents in a power system applicable to estimating space weather risks and design remedies", Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics 64, 2002.

[3] J. K. Kappenman, "Storm sudden commencement events and the associated geomagnetically induced current risks to ground-based systems at low-latitude and midlatitude locations", Space Weather, Vol. 1, No 3, 1016, 2003.

[4] M. S. Bologna, A. L. Padilha, I. Vitorello, "Geophysical signature of the deep lithosphere underlying the Alto Paranaíba Igneous Province: Constraining upper mantle properties", Revista Brasileira de Geociências 31(4), 2001.

[5] W. Kabata, M. J. F. Barbosa, K. Batista, M. B. Pádua, M. S. Bologna, I. Vitorello, A. L. Padilha, W. C. Cunha, "Magnetômetro tipo *fluxgate* para aplicações em Sondagens Geomagnéticas Profundas (GDS) no Brasil", Anais VIII Congresso Internacional da SBGf, Rio de Janeiro, 2003.

[6] N. B. Trivedi, F. X. K. Ogura, J. C. de Andrade, J. M. da Costa, L. M. Barreto, "A Ring Core Magnetometer for IEEY Program in Brazil", Revista Brasileira de Geofísica 13, 1995.

[7] A. Viljanen, "Relation of Geomagnetically Induced Currents and Local Geomagnetic Variations", IEEE Trans. On Power Delivery, vol, 13, no 4, Oct. 1998.

[8] P. R. Price, "Geomagnetically Induced Current Effects on Transformers", IEEE Trans. On Power Delivery, vol. 17, Oct 2002.

[9] S. Lu, Y. Lia, J. De La Ree, "Harmonics generated from a DC biased transformer", IEEE Trans. On Power Delivery, vol. 8, Apr. 1993.

[10] M. Lahtinen, J. Eleovaara, "GIC Occurrences and GIC Test for 400kV System Transformer", IEEE Trans. On Power Delivery, vol. 17, Apr. 2002.

[11] W. Chandrasena, P. G. McLaren, U. D. Annakkage, R. P. Jayasinghe, "An Improved Low-Frequency Transformer Model for Use in GIC Studies", IEEE Trans, On Power Delivery, vol. 19, no 2, Apr 2004.
