



**XXIII SNPTTE  
SEMINÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

FI/GDS/30  
18 a 21 de Outubro de 2015  
Foz do Iguaçu - PR

**GRUPO –X**

**GRUPO DE ESTUDO DE DESEMPENHO DE SISTEMAS ELÉTRICOS – GDS**

**REVISITANDO AS CORRENTES GEOMAGNETICAMENTE  
INDUZIDAS NO BRAZIL: OS 5 ANOS DE DADOS DE ITUMBIARA**

**Livia Ribeiro Alves(\*)**

**Alexandre Pinhel  
Guilherme Sarcinelli**

**Antonio Lopes Padilha  
Marcelo Banik  
Antônio M. Vinhosa Netto  
Wanderli Kabata  
INPE**

**INPE**

**FURNAS**

**INPE**

**RESUMO**

Este trabalho apresenta resultados obtidos durante 5 anos de medição, investigando corrente elétrica geomagneticamente induzidas (GIC) em transformadores. As medições foram feitas utilizando amperímetro Hall instalado no neutro de um transformador do banco de 500kV da SE Itumbiara, ativo de Furnas. Esse fenômeno tem sido estudado em uma cooperação de Furnas com o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) desde 2001. Os registros mostram a ocorrência e intensidade de GIC em um transformador localizado em região de média latitude durante tempestades geomagnéticas.

**PALAVRAS-CHAVE**

Correntes Geomagneticamente Induzidas, Compatibilidade Eletromagnética, Colapso de tensão, Desempenho de Sistemas Elétricos, Transformadores.

**1.0 - INTRODUÇÃO**

Assegurar a manutenção do fornecimento de energia elétrica e de sua qualidade é um tema que tem exigido grandes esforços técnicos e científicos nos últimos anos. Isso ocorre pelo fato de o fornecimento de energia elétrica estar constantemente exposto a agentes internos ao sistema e externos a ele, os quais podem comprometer a qualidade do serviço. É prática do setor o conhecimento da ampla variedade dos eventos capazes de influenciar nos parâmetros da rede, para atuar no sentido de mensurar esses fenômenos, qualificá-los quanto a sua capacidade danosa e controlá-los quando possível. Dentre os agentes potencialmente causadores de interferências negativas na rede, destacam-se a exposição dos equipamentos ao crescimento da demanda no fornecimento de energia elétrica, a escassez de recursos naturais, o envelhecimento dos equipamentos e, as intempéries que podem ser tanto tempestades elétricas (eventos atmosféricos) como tempestades magnéticas (eventos de clima espacial). Neste trabalho iremos nos concentrar nesses últimos casos.

Os eventos de Clima Espacial são aqueles causados por variações bruscas no campo geomagnético, que em geral estão associadas à alterações nos padrões de corrente elétrica presentes no solo. A origem desses fenômenos está no fato de que a Terra e o Sol integram um sistema que é sujeito a variações não apenas meteorológicas, mas também alterações nos parâmetros físicos do Sol, da magnetosfera, da ionosfera e termosfera. Essas alterações nos parâmetros físicos do Sol podem influenciar o desempenho e a integridade de uma variedade de sistemas tecnológicos instalados na superfície da Terra (1), (2). Os efeitos oriundos de eventos do clima espacial representam um desafio à comunidade científica e tecnológica quanto ao seu acompanhamento, previsão e mitigação.

(\*) Av. dos Astronautas, n° 1758 – CEA - sala 17 - Predio CEA II – CEP 12227-010 São José dos Campos, SP – Brasil. Tel: (+55 12) 3208-7741 – Fax: (+55 12) 3208-7898 – Email: livia.alves@inpe.br

Dentre os fenômenos geomagnéticos que são monitorados pelos centros regionais de clima espacial, as tempestades geomagnéticas são os mais importantes, por terem associados a elas grandes quantidades de energia (3). A frequência de ocorrência dos eventos de tempestades varia em função de sua intensidade. Levantamentos realizados pelo centro de clima espacial, pertencente ao programa americano NOAA ('Administração Nacional Oceanográfica e Atmosférica'), concluíram que cerca de 1700 eventos na categoria fraca podem ocorrer ao longo de um ciclo de 11 anos, enquanto para tempestades consideradas severas, são esperadas cerca de 100 eventos para o mesmo período e, somente 4 eventos para o caso de tempestades classificadas como extremas. As tempestades geomagnéticas são classificadas de acordo com a magnitude da variação do campo geomagnético. Dependendo de onde ocorram, essas variações podem induzir correntes em sistemas metálicos com conexões com o solo (aterrados), como é o caso das linhas de transmissão de energia elétrica (4).

Esse contexto foi interpretado por Furnas como uma oportunidade de investigação desses fenômenos em uma de suas linhas de transmissão, em parceria com o INPE. Esta parceria, firmada em 2001, evoluiu para um projeto de pesquisa no qual se propôs a avaliar os efeitos das GICs em sistemas de transmissão de energia elétrica no centro-oeste e sudeste brasileiro. O estudo previa a utilização de três dispositivos de medição, posicionados em locais de interesse para medições de corrente elétrica, a partir da monitoração das variações geomagnéticas com magnetômetros operando em pontos abaixo das LTs e com sensores Hall desenvolvidos para serem instalados no neutro do transformador. O presente trabalho traz o resultado obtido a partir das medições realizadas ao longo de cinco anos de observações, os resultados obtidos por essa parceria fornecem meios de se avaliar quais são os níveis de GIC observados no Brasil e com que frequência eles ocorrem. Os valores de GIC aqui apresentados são o resultado de um trabalho de mais de cinco anos que é único em toda América Latina, a apresentar níveis de corrente geomagneticamente induzidas obtidos por um instrumento operando por longo prazo. Com base nesses resultados, foi possível analisar diferentes tempestades ocorridas durante o período de operação do sensor e eles consistem na única fonte de informação dessa grandeza no território brasileiro.

Atualmente observa-se o ressurgimento do interesse das GICs pelo Setor Elétrico, inclusive com criação de grupo de trabalho no Comitê de Estudo sobre desempenho de sistemas elétricos (SC-C4)<sup>1</sup>.

Esse trabalho apresentará os resultados dessa análise que, além de contribuir com os estudos do Cigré, poderá servir para posicionar melhor o tema dentro das prioridades das empresas de energia elétrica no Brasil.

## 2.0 - ASPECTOS TEÓRICOS

### 2.1 Indução geoeletrica e correntes geomagneticamente induzidas

Durante uma tempestade magnética, o campo geomagnético apresenta significativas variações de magnitude em função do tempo. De acordo com a lei da indução de Faraday, Equação (1), as variações temporais do fluxo magnético ( $\phi_B$ ) induzem campo elétrico (E), que por sua vez também oscila no tempo, induzindo campo magnético, este é o mecanismo de geração de onda eletromagnética por indução.

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \frac{d\phi_B}{dt} \quad (1)$$

A profundidade de penetração da onda eletromagnética no interior da Terra e a distância percorrida, são função da frequência da onda e da resistividade do solo. Na fronteira ar/Terra, as componentes de baixa frequência da frente de onda podem difundir-se verticalmente, penetrando dezenas de quilômetros, enquanto as de alta frequência se propagam horizontalmente e verticalmente, dependendo do contraste de condutividade existente entre os meios. A direção de propagação do campo e, conseqüentemente, da corrente é Leste-Oeste.

Dado um campo elétrico em um meio com condutividade finita e uma diferença de potencial conhecida, estabelece-se uma densidade de corrente elétrica (J), segundo a lei de Ohm (Equação 2).

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (2)$$

Na Equação (2),  $\sigma$  é a condutividade do meio. A esta corrente induzida por efeito do Clima Espacial denomina-se Corrente Geomagneticamente Induzida (Geomagnetically Induced Current – GIC). As GICs são correntes com frequência da ordem de milihertz e por isso são denominadas correntes quase-DC quando comparadas com a frequência de oscilação da rede.

A ocorrência de GIC em regiões de média e baixa latitudes tem sido medida em muitos países cujos territórios não apresentam interferências associadas com efeitos de alta latitudes. Na região do Brasil, a intensidade das correntes

<sup>1</sup> Há previsão de criação de grupo de trabalho no Comitê de Estudo sobre transformadores (SC-A2).

induzidas foi determinada a partir de análises do conjunto de dados parciais dentro da colaboração INPE/FURNAS e é da ordem de unidades a dezenas de amperes (5) e (6) para uma tempestade moderada a intensa. Os seguintes países também com localização em baixa latitude tem apresentado resultados sobre as pesquisas para medida de GIC, são eles, África do Sul (7), Austrália (8), Espanha (9), China e Japão (10), por exemplo.

### 3.0 METODOLOGIA DA MEDIÇÃO

#### 3.1 Descrição da Escolha da LT

Para a obtenção de resultados conclusivos a respeito da influência das GICs nos Sistemas de Transmissão de Energia Elétrica, a escolha dos locais de medição é fator importante para o sucesso do monitoramento. Por se tratar de uma área interdisciplinar, é necessário conhecer detalhes dos aspectos de engenharia da linha como também os valores de resistividade do solo onde é feito o aterramento do local desejado para realização da medição.

Para escolha da linha de transmissão dentro de todo o universo de FUNAS primeiramente, foram descartadas as LTs com capacitor série, pois estes bloqueiam o fluxo da corrente GICs, uma vez que essas têm componentes de frequências muito baixas (quasi-DC). Deu-se então 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 (10), (6), (2).

Outro fator relevante para escolha do local de medição está associado a resistividade do solo experimentada pela pontos de aterramento da linha. Regiões cujos solos são mais resistivos em grande profundidade colaboram para que a GIC observada seja mais elevada do que em regiões com solo com menor resistividade. O INPE dispõe de uma base de dados de resistividade com registros realizados em diversas localidades no Brasil. Assim, foi possível optar pelo local de medição a partir dos dados de solo disponíveis. Essas condições levaram à escolha da LT Itumbiara-São Simão (10).

#### 3.2 Método de Medição de GIC em linhas de transmissão e transformadores

A medição de GIC realizada no sistema de transmissão deve ser realizada sem que haja qualquer interferência na LT ou no transformador. Os métodos de medição utilizados com maior frequência são: a medida de corrente obtida por magnetômetros posicionados em baixo da linha e, a medição de corrente por efeito Hall utilizando um medidor instalado de forma passiva no neutro do transformador.

A técnica de medição baseada no emprego de magnetômetro, utiliza um instrumento de alta sensibilidade que é posicionado em baixo da LT, a medição realizada por este equipamento é comparada com o resultado obtido por outro equipamento idêntico localizado há uma distância grande o suficiente para não sofrer a influência da LT. No caso do presente trabalho, o magnetômetro esteve instalado por um período de cerca de um mês coletando dados diariamente abaixo da LT e os resultados foram comparados com o de outro instrumento localizado em Vassouras. Por se tratar de um experimento que não ficou operante por um período longo, os resultados não serão abordados no presente trabalho, os resultados obtidos dessa medição encontram-se nas referências (2), (5) e (6).

A segunda técnica de medição aplicada foi baseada na utilização de um sensor de corrente baseado em efeito Hall. O circuito eletrônico desse sensor foi desenvolvido de forma a favorecer a geometria para a aplicação na medição de GIC em neutro de transformador sem que houvesse interrupção do cabo ou contato com ele. Dado que o cabo do neutro do transformador não possui uma simetria perfeitamente cilíndrica, a mecânica de instalação deste sensor foi desenvolvida utilizando um encaixe que permite ao elemento sensível do circuito estar a 1 mm de distância do cabo, posicionado acima do mesmo.

O sensor Hall foi construído utilizando um par de microchips que atuam como sensores. A montagem em par tinha por finalidade minimizar ruído eletromagnético. Como o sensor opera em uma temperatura de cerca de 50° C, um termômetro foi instalado junto ao sensor para monitorar variações de temperatura que pudessem causar prejuízos às medições realizadas.

A instalação do sensor no cabo contou com uma caixa de proteção contra umidade e uma manta de isolamento térmica para evitar variações de grande amplitude térmica (Figura 1). Os dados obtidos pelo sensor eram levados, via cabo, ao conversor A/D ligado ao computador posicionado a cerca de 200 m do local de medição.

O armazenamento dos dados é realizado através de software. Os dados coletados eram convertidos para corrente elétrica. O sistema então armazena os valores de corrente elétrica em função do tempo, com seis aquisições por minuto, para cada dia de medição.

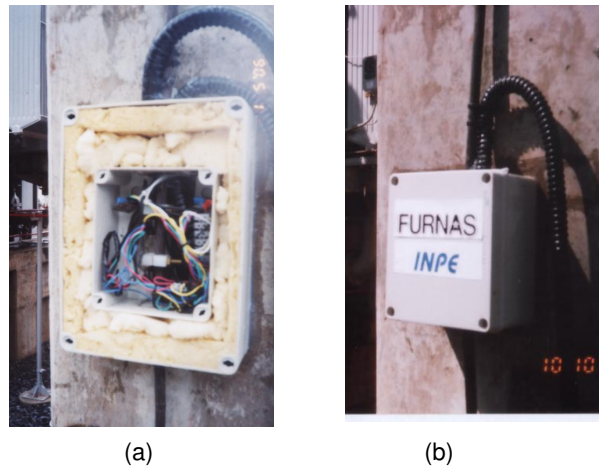


Figura 1. Detalhe da instalação da unidade sensora instalada no cabo neutro do transformador. Em (a) é possível observar a proteção térmica e em (b) a versão final do sensor instalado.

A consulta ao banco de dados foi desenvolvida de modo a duplicar a armazenagem, com um centro de coleta em Furnas e outro no INPE. Os dados eram coletados e enviados aos servidores via Ethernet a cada cinco minutos. Os dados finais já calibrados podem ser observados a partir de uma ferramenta web que permite acessar os dados por dia de aquisição, conforme exemplo na Figura 2.



Figura 2. Ferramenta web desenvolvida pelo INPE para apresentação dos dados de GIC e temperatura do sensor

#### 4.0 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os dados obtidos ao longo de quatro anos de medição foram analisados individualmente mediante a informação de ocorrência de tempestades entre 2009 e 2014. Ao todo, ocorreram 32 eventos classificados como tempestade com intensidades variadas, conforme sumarizado na tabela 1. Não há registro de ocorrência de GIC em dias em que não houve tempestade.

Na tabela 1 são apresentados as datas em que houve GIC medidas e o dia em que foi observada durante as tempestades. Os organismos internacionais de clima espacial, em cooperação com a comunidade científica, As tempestades geomagnéticas são classificadas em uma escala que varia de intensidade fraca a extrema, a partir da observação do campo geomagnético observado em todo globo terrestre. Esta escala não reproduz a intensidade da GIC observada, mas é um dos parâmetros utilizados para se determinar a possibilidade de ocorrência da GIC e sua faixa de amplitude, e consequentemente, efeitos na LT.

Tabela 1 – Data, intensidade e GIC das tempestades ocorridas nos 5 anos de medição

Ano	Dia	Categoria	GIC (A)
2010	20/01	> G1	1,5
	04-05/04	G4	-
	01-02/05	G2	1,5
	28-29/05	G1	1,5
	03-05/08	G2	2,4
	23-25/08	> G1	1,2
2011	11/10	> G1	1,3
	06-07/01	G1	1,5
	04-05/02	G2	-
	26-28/05	G2	1,0
	05-06/08	G4	6,0
	09/09	G2	5,5
	17/09	G2	2,0
	26/09	G2	5,0
	24-25/10	G3	4,2
	22-24/01	G1	3,0
2012	07/03	G2	2,0
	08-09/03	G4	3,5
	12/03	G2	3,4
	15/03	G2	3,5
	23/04	G2	1,5
	16/06	G2	6,5
	15/07	G3	4,5
	03-04/09	G2	2,4
	30/09	> G1	-
	08-09/10	G3	2,5
	12-14/11	G2	-
	17/03	G3	-
2013	01/06	G3	-
	29/06	G2	3,0
	02/10	G4	8,0
	08/10	G2	8,5

Na tabela 1 constam somente as datas que houve tempestade e o sensor estava operando corretamente. Dados parcialmente completos ou com falha durante a medição foram descartados. Os valores de GIC se referem a eventos ocorridos tanto durante o dia com no período da noite e, em geral, apresentam níveis similares. O levantamento considerou apenas os efeitos capazes de gerar correntes acima de 1 A com características que pudessem ser associadas as variações de campo geomagnético, sendo que este parâmetro era medido por um instrumentos pertencentes a rede de monitoramento de clima espacial EMBRACE/INPE.

Observou-se a partir dos dados obtidos e dos resultados na referência (2) que os valores de correntes medidos durante tempestades variam de 3 A até 8,5 A (podendo chegar a 15 A, conforme (2)) e podem apresentar duração de minutos em tempestades moderadas, há algumas horas em tempestades intensas. O registro da corrente medida sempre foi acompanhado pela análise do gráfico de temperatura do dia, o qual permite assegurar que o sensor operava em condições usuais.

Em todas as ocasiões em que houve uma corrente elétrica medida por este instrumento, ela estava associada a uma tempestade geomagnética, no entanto, nem todas as tempestades geomagnéticas foram responsáveis por ocasionar GIC, principalmente àquelas em as variações de campo geomagnético foram menores. Durante o período de medição deste sensor, não foi observada nenhuma tempestade na categoria extrema o que poderia resultar em correntes mais elevadas.

O grau de intensidade de uma tempestade é definido, principalmente, a partir de instrumentos que monitoram o campo geomagnético em altas latitudes, por essa razão não se pode afirmar que os impactos das tempestades na região do estudo sejam completamente conhecidos. Por essa razão observou-se que em muitos casos a intensidade da GIC medida não está diretamente relacionada com a intensidade da tempestade. Necessitando de mais estudos com a ocorrência de tempestades para que se possa construir um índice associado a intensidade de GIC observada em média latitude.

### 3.0 - CONCLUSÃO

Os resultados apresentados na tabela 1 obtidos pela cooperação INPE/Furnas durante cinco anos de medição são inéditos e possibilitam conhecer os níveis de corrente elétrica que podem ser observados em média latitude, como também com que frequência eles ocorrem. É parte integrante dessa cooperação os resultados apresentados nas referências (2), (4), (5) e (6) que apresenta dados obtidos durante uma tempestade com intensidade de moderada a intensa, ocorrida dentro da colaboração.

Os valores de corrente medidos nesse trabalho demonstram que apesar de a LT escolhida estar localizada no oeste do Brasil, em um terreno em que a propagação de GIC não é favorecida, são observadas correntes de até 8A em tempestades moderadas e 15 A em tempestades intensas (2). Com base nesses resultados é possível verificar que essas correntes são observadas em nossa território, em linha de transmissão que não apresentam proteção capacitiva e podem ocorrer em qualquer localidade. Os valores de correntes medidos podem variar entre uma instalação e outra, dependendo das características do solo de aterramento e da extensão da linha. São necessárias maiores investigações referentes aos processos de GIC que ocorrem nas regiões de média latitude para se determinar qual deve ser o valor máximo esperado durante uma tempestade e de quanto tempo deve ser sua duração desse corrente em um transformador durante tempestades intensas e extremas.

Os trabalhos futuros dessa colaboração pretendem substituir o atual sensor, por um sistema mais moderno com processamento de dados embarcado que possibilite maior autonomia de operação e controle de falhas no sensor.

### 4.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Pirjola, R., Viljanen, A., Pulkkinen, A., Kilpua, S., Amm, O. "Effects of Space weather on technology infrastructure". Editado por Daglis, I.A, Springer, pp. 235-256, 2005
- (2) Trivedi, N. B., Vitorello, I., Kabata, W., Dutra, S. L. G., Padilha, A. L., Bologna, M. S., Pádua, M. B., Soares, A. P., Luz, G. S., Pirjola, R., Viljanen, A. Geomagnetically induced currents in an electric power transmission system at low latitudes in Brazil: A case of study, Space Weather 5/S04004, 2007.
- (3) Viljanen, A. Relation of Geomagnetically induced currents and local geomagnetic variations. IEEE Transactions on Power Delivery 13, 4, 1998.
- (4) Soares, A. P. ; Luz, G. S. ; Trivedi, N. B. ; Kabata, W. ; Padilha, A. L. ; Dutra, S. L. G. . Simulação computacional dos efeitos das Correntes Geomagneticamente Induzidas (GIC) em linhas de transmissão na Região Sudeste do Brasil. In: XVIII SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 2005, Curitiba - PR. XVIII SNPTEE, 2005.
- (5) Soares, A. P. ; Trivedi, N. B. ; Dutra, S. L. G. ; Padilha, A. L. ; Luz, G. S. ; Pinto, F. A. . Determinação de correntes elétricas geomagneticamente induzidas (GIC) em sistemas de transmissão de energia elétrica no Brasil. In: III Citenel - Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica, 2005, Florianópolis - SC. III Citenel, 2005.
- (6) Soares, A. P. ; Trivedi, N. B. ; Vitorello, I. ; Luz, G. S. ; Dutra, S. L. G. ; Kabata, W. . Evaluation of Geomagnetically Induced Currents (GIC) effects on Electrical Power Systems in the Southeastern Brazilian Region. In: X SEPOPE - Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica, 2006, Florianópolis - SC. X SEPOPE, 2006.
- (7) Bernhardt, E.H.; Cilliers, P.J.; Gaunt, C.T. Improvement in the modelling of geomagnetically induced currents in southern Africa, South African Journal of Science, Vol. 104, No. 7/8, 265-272, 2008.
- (8) Marshall, R. A., Smith, E. A., Francis, M. J., Waters, C. L., Sciffer, M. D. A preliminary risk assessment of the Australian region power network to space weather. Space Weather 2011 9/S10004.
- (9) Torta, J. M., L. Serrano, J. R. Regué, A. M. Sánchez, and E. Roldán, Geomagnetically induced currents in a power grid of northeastern Spain, Space Weather, 10, S06002, 2012.
- (10) Trivedi, N. B. ; Soares, A. P. ; Vitorello, I. ; Kabata, W. ; Dutra, S. L. G. ; Padilha, A. L. ; Bologna, M. S. ; de Pádua, M. B. ; Luz, G. S. . Geomagnetically induced currents (GIC) in electric power system at low latitudes in Brazil: A case study. In: 9th International congress of the Brazilian Geophysical Society, 2005, Salvador - BA. 9th International congress of the Brazilian Geophysical Society, 2005.

## 5.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



- Livia Ribeiro Alves: Bacharel em Física pela USP em 2003, Mestre em Física também pela USP em 2006 e Doutora em Engenharia e Tecnologia Aeroespacial pelo INPE em 2011. Tem experiência na área de eletromagnetismo aplicado, tendo trabalhado na Fundação CPqD de 2011 a 2013, desde 2013 é Pesquisadora do INPE, atuando na área de impactos de clima espacial em sistemas aterrados.