

DESEMPENHO DO FILTRO MORFOLÓGICO PARA DETECÇÃO DE CORRENTES GEOMAGNETICAMENTE INDUZIDAS UTILIZANDO DADOS DE SIMULAÇÃO EM OPENDSS®

FABIANA C. LAGOAS, EDUARDO M. DOS SANTOS, JOHN J. A. SALDANHA, ANA P. LORENZONI,
FERNANDA C. RAMOS, HENRIQUE STEIN, JOÃO P. JUCHEM NETO

*Grupo de Energia e Sistemas Elétricos de Potência, Universidade Federal do Pampa
Av. Tiarajú, 810 - Bairro: Ibirapuitã - Alegrete - RS - CEP: 97546-550*

*E-mails: fabiana.lagoas@gmail.com; eduardosantos@unipampa.com;
applorenzoni@gmail.com; john.jefferson.as@gmail.com;
fernanda.cazabonet@gmail.com; hstein@gmail.com; plini@unipampa.edu.br;*

Abstract— Geomagnetic Induced Currents (GICs) result from the interaction between the ionized particles of solar flares with the Earth's magnetic field. When penetrate in the Electric Power System, these currents can cause not programmed disconnections in the network sections, as a result of the action of protection systems, besides the damages caused to the devices connected to the system when this current has great magnitude and long duration. This paper shows the performance of a morphological filter for detection of those currents, which was implemented in Matlab® and tested for the processing of current signals generated by computational simulation of a test system in EMTP-ATP® software. The GICs values tested were obtained from OPENDSS® software, which calculates the geomagnetically induced current flow based on data such as the line length and the respective latitudes and longitudes of its terminals. The parameters evaluated in these simulations correspond to the transmission line ALE SE x SMA1 data, 138 kV, belonging to the concession area of the CEEE-GT. The results obtained through simulations in OPENDSS® showed the occurrence of GICs in the studied line. Finally, it was found that the proposal for the detection of these currents, acted correctly in all analysed cases.

Keywords— Geomagnetic Induced Currents, problems, protection, system test, simulations.

Resumo— Correntes Geomagneticamente Induzidas (GICs) são resultantes da interação entre partículas ionizadas provenientes de erupções solares com o campo magnético da Terra. Tais correntes, ao penetrarem no Sistema Elétrico de Potência, podem provocar desligamentos não programados em trechos da rede, em consequência da atuação dos sistemas de proteção, além de danificar equipamentos vinculados ao sistema, quando de grande magnitude e longa duração. Este trabalho apresenta o desempenho de um filtro morfológico para detecção dessas correntes, o qual foi implementado em Matlab® e foi testada a partir do processamento de sinais de corrente, gerados computacionalmente pela simulação de um sistema teste no software EMTP-ATP®. Os valores de GICs testados foram obtidos a partir do software OPENDSS®, o qual calcula o fluxo de corrente geomagneticamente induzida a partir de dados como o comprimento da linha e as respectivas latitudes e longitudes de seus terminais. Os parâmetros avaliados nas referidas simulações correspondem aos dados linha de transmissão ALE SE x SMA1, de 138 kV, pertencente à área de concessão da CEEE-GT. Os resultados obtidos através das simulações em OPENDSS® mostraram a ocorrência de GICs na linha estudada. Por fim, verificou-se que a proposta para detecção dessas correntes, atuou corretamente em todos os casos analisados.

Palavras-chave— Correntes Geomagneticamente Induzidas, problemas, proteções, sistema teste, simulações.

1 Introdução

Num contexto geral, o campo magnético da Terra funciona como um escudo para a massa coronal, projetada durante as tempestades solares, evitando que as mesmas atinjam diretamente a superfície do planeta (Boteler, *et al.* 1998).

Essa massa coronal é formada por partículas ionizadas, as quais são aprisionadas no campo magnético terrestre, permanecendo em movimento entre as linhas do referido campo. Esse movimento caracteriza a formação de correntes elétricas em altas altitudes (além da atmosfera), provocando alterações no campo magnético terrestre. Tais correntes são espelhadas na superfície do planeta, podendo circular em caminhos paralelos como cabos telefônicos, dutos metálicos, vias férreas e linhas de transmissão (Pinto, *et al.* 2003).

Tais correntes espelhadas são conhecidas como correntes geomagneticamente induzidas ou GICs (do inglês *Geomagnetical Induced Currents*) e apresentaram-se como componentes quase contínuas, com frequência inferior a 1Hz, as quais afetam significativamente o funcionamento de sistemas de comuni-

cação, de satélites e de sistemas elétricos de potência, onde penetram através dos aterramentos.

Nesse contexto, para avaliar o grau de correlação entre o número de eventos geomagnéticos e a atividade solar, são utilizados dois índices, conforme (Mustafa, *et al.* 2013): Dst (*Disturbance Storm Time*) e o Kp (*Planetary Kennziffer*). Ressalta-se que o fenômeno das GICs é amplamente estudado no hemisfério Norte, conforme (Moore, *et al.* 2014), onde, comprovadamente, já provocou grandes blecautes (Kappenman, *et al.* 1997).

Sendo assim, do ponto de vista dos sistemas elétricos de potência, sabe-se que as linhas de transmissão longas, no sentido da latitude (horizontais), sobre rochas ígneas, estão mais sujeitas a ocorrência de GICs (Russelli, *et al.* 1997). Nas redes elétricas, as GICs penetram pelos aterramentos. Normalmente, em simulações, essas correntes são aproximadas por pulsos de corrente quase contínua (Girgis, *et al.* 2012).

Este trabalho apresenta o desempenho de um filtro para detecção de GICs, o qual foi implementado em Matlab® e testado a partir do processamento de sinais de corrente, gerados computacionalmente pela

simulação de um sistema teste no software EMTP-ATP®. Os valores de GIC testados foram obtidos a partir do software OPENDSS®, o qual calcula o fluxo de corrente geomagneticamente induzida a partir de dados como o comprimento da linha e as respectivas latitudes e longitudes de seus terminais.

Os parâmetros avaliados nas referidas simulações correspondem aos dados da linha de transmissão ALE SE x SMA1, de 138 kV, pertencente à área de concessão da CEEE-GT. Os resultados obtidos através das simulações em OPENDSS® mostraram a ocorrência de GICs na linha estudada. Por fim, verificou-se que a proposta para detecção dessas correntes, atuou corretamente em todos os casos analisados.

2 Geomagnetismo

Conforme dito na Seção 1, quando ocorre uma tempestade geomagnética, partículas ionizadas são aprisionadas na magnetosfera terrestre, as quais movimentam-se produzindo correntes elétricas em grandes altitudes. Essa variação de energia causa alterações no campo magnético da terra, o qual se aproxima da superfície. Essa alteração do campo magnético terrestre pode ser observada na Figura 1, onde é mostrada a deformação do campo magnético no momento em que uma explosão solar se aproxima da magnetosfera. Nessa Figura, pode-se perceber o achatamento do campo magnético no lado diurno e o alongamento do campo do lado noturno do planeta.

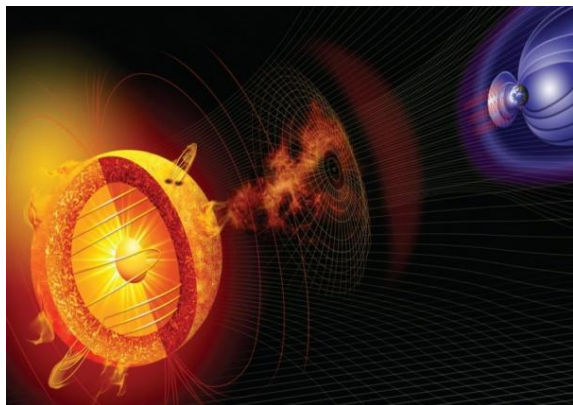


Figura 1. Comportamento do campo magnético no momento de uma explosão solar.

Ressalta-se que o campo magnético terrestre se assemelha a um dipolo magnético com seus polos próximos aos polos geográficos. Traçando uma linha imaginária entre os polos sul e norte magnéticos, observa-se uma inclinação de aproximadamente $11,3^\circ$ entre o eixo de rotação e os polos magnéticos do planeta (Pereira, *et al.* 2012).

Uma vez aprisionadas no campo magnético terrestre, as partículas ionizadas provenientes das erupções solares movimentam-se entre as linhas desse campo. Por efeito das leis de indução eletromagnética, esse movimento das partículas ionizadas induz as GICs na superfície terrestre, as quais circulam nos caminhos paralelos como as

linhas férreas, os sistemas de comunicação, as redes elétricas e as tubulações metálicas (Pinto, *et al* 2003).

A teoria do dínamo é a mais aceita para explicar a origem do campo magnético terrestre, o qual se estende por dezenas de milhares de quilômetros no espaço, formando a magnetosfera (Pereira, *et al* 2012). Também, destaca-se que as linhas de campo da Terra saem do pólo Sul geográfico, que corresponde ao Norte magnético da Terra, em direção ao pólo Norte geográfico, o qual corresponde ao Sul magnético. É nesse campo que as partículas ionizadas provenientes dos ventos solares ficam aprisionadas, induzindo as GICs na superfície terrestre.

3 GICs no Sistema Elétrico de Potência

Observando a Figura 2, percebe-se que as GICs penetram na rede elétrica através dos aterramentos dos dispositivos que compõem o sistema. O circuito para passagem dessas correntes encerra-se no solo através de um aterramento a jusante. A força eletromotriz é a tensão induzida nas próprias linhas de transmissão, tanto pela corrente ionosférica, quanto pela corrente que flui na terra. Embora a GIC fique variando, ela pode ser classificada como uma corrente quase contínua, uma vez que essas variações ocorrem em frequências bem abaixo de 1 Hz (Pinto, *et al* 2003).

Vale ressaltar que terrenos compostos por rochas ígneas são ideais para o surgimento de GICs. Ainda, vale ressaltar que as linhas horizontais, paralelas ao eixo das latitudes, são mais susceptíveis a ocorrência desse fenômeno.

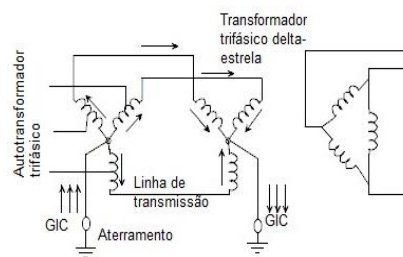


Figura 2. GIC no sistema elétrico de potência.

Uma GIC circulando na rede elétrica se soma a corrente existente no sistema, provocando *offsets* (deslocamentos) nas formas de onda dos sinais de corrente. A circulação das GICs no sistema elétrico provoca o desgaste dos equipamentos que compõem o sistema, reduzindo sua vida útil.

Além disso, as sobrecargas decorrentes das GICs podem causar a atuação dos relés de proteção, uma vez que seus ajustes sejam ultrapassados. Ainda, sabe-se que as GICs provocam saturação do núcleo de transformadores de potência, pois possuem um circuito magnético, o qual pode ser interrompido por uma GIC “quase” contínua. O campo produzido pelo pulso eletromagnético desloca o ponto de operação do circuito magnético. Assim, o transformador pode entrar em saturação. Isto produz harmônicas e

elevação da temperatura, além de consumir potência reativa, além de provocar a queda de tensão em seus terminais secundários, o que, em casos extremos, pode levar o sistema a um colapso de tensão (Fuchs, *et al.* 2011).

4 Gics no Brasil

O Brasil e grande parte da América do Sul estão localizados em uma região de anomalia do campo magnético terrestre, caracterizada pela baixa intensidade do campo magnético total, chamada Anomalia Geomagnética do Atlântico Sul (SAGA), conforme a Figura 3. Os cinturões de Van Allen aproximam-se da Terra, reduzindo a espessura da magnetosfera, facilitando a migração das partículas ionizadas entre as linhas de campo. Assim, todos Estados do Sul do Brasil pertencem a esta área de anomalia, incluindo o estado do Rio Grande do Sul, onde existem suspeitas de que a atuação indevida de algumas proteções pode estar relacionada com a ocorrência de GICs.

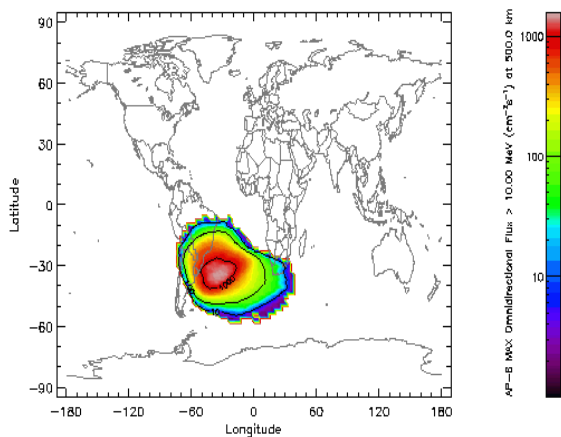


Figura 3. Corte detalhado da Anomalia.

Lembrando que, no Brasil, quando da ocorrência de um desligamento não programado, as concessionárias de energia devem justificar a causa deste, caso contrário são severamente multadas pelos órgãos reguladores. No entanto, a ocorrência de GICs pode provocar um desligamento indevido sem serem detectadas, dificultando a justificativa para tal interrupção no fornecimento de eletricidade (Mustafa *et al.*, 2013).

No Brasil, já foram constatadas e comprovadas a ocorrência de GICs em São José (Furnas), Adrianópolis (Furnas) e Magé (CERJ), todas localizadas no Rio de Janeiro, além da ocorrência dessas correntes na cidade de Cabreúva- SP (Pinto, *et al.* 2003).

Entretanto, na maioria das vezes as GICs são de curta duração e de baixas magnitudes, não sendo percebidas pelos dispositivos de proteção e provocando o desgaste dos equipamentos (Pereira, *et al.* 2012). Os principais equipamentos passíveis de falha num SEP quando há a ocorrência GICs no sistema são os transformadores de potência, os

transformadores de corrente e de potencial, os bancos de capacitores e as linhas de transmissão.

No Rio Grande do Sul, a linha de transmissão Santa Maria – Alegrete tem sofrido com desligamentos decorrentes da atuação inexplicada dos relés de proteção, para os quais especula-se a ocorrência de GICs como causa desses desligamentos (Fuchs, *et al.* 2011). Os dados apresentados na seção 6.1 são referentes a esta LT, a qual foi objeto de estudo neste trabalho.

5 Detecção de Correntes Geomagneticamente Induzidas

O filtro proposto é inspirado na técnica apresentada por (Wu, *et al.* 2009) para remoção da componente unidirecional exponencialmente decrescente (componente DC) das correntes de curto-circuito.

Então para a detecção das correntes geomagneticamente induzidas foi utilizado operadores da morfologia matemática denominados dilatação (1) e erosão (2), os quais auxiliam na detecção das anomalias causadas pelas GICs nas formas de onda dos sinais de corrente da rede (Szczipak, *et al.* 2004). Nas Equações abaixo, x representa a posição da amostra na janela $W(n,x)$ e varia de 1 até N , para cada janela de amostras.

$$W(n,x) \oplus SE = \max[W(n,x) + SE(n)] \quad (1)$$

$$W(n,x) \ominus SE = \min[W(n,x) - SE(n)] \quad (2)$$

O filtro processa uma janela com conjunto W_1 contendo N amostras, onde N representa o número de amostras por ciclo (frequência fundamental), conforme (3).

$$W_1(n) = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ \dots \ x_N] \quad (3)$$

Em (3), n representa a amostra atual. Essa janela é móvel e a cada nova amostra, o primeiro termo da janela (x_0) é descartado e os demais são deslocados para a esquerda. Dessa forma, a amostra atual é alocada na última posição (x_n).

Em cada janela, são aplicados os operadores morfológicos básicos de erosão e dilatação, modificados para este fim. Uma vez que a SE adotada para detecção de GICs é nula ($SE = 0$), as Equações (1) e (2), expostas nesta seção tornam-se as expressões descritas nas Equações (4) e (5).

$$W_1(n) \oplus SE = \max[W_1(n)] \quad (4)$$

$$W_1(n) \ominus SE = \min[W_1(n)] \quad (5)$$

O valor da GIC é dado pela média da soma entre os resultados obtidos a partir das Equações (4) e (5), conforme a Equação (6). O valor de $GIC(n)$

representa a componente contínua que provoca o offset na forma de onda de corrente.

$$GIC(n) = \frac{W_1(n) \oplus SE + W_1(n) \ominus SE}{2} \quad (6)$$

Esta metodologia foi implementada no Matlab® e apresenta bom desempenho e precisão na detecção de GICs, conforme os resultados obtidos.

Uma vez que as GICs, por se tratarem de pulsos de corrente quase contínua, apresentam-se como offsets nas formas de onda dos sinais de corrente, é possível extrair a componente que provoca esta distorção com o auxílio da Morfologia Matemática.

6 Simulação de GICs utilizando o OPENDSS®

Denominada ALE SE - SMA1 de 138 kV, a linha de transmissão (LT) analisada neste estudo pertence à área de concessão da CEEE-GT e está localizada entre as cidades de Alegrete e Santa Maria.

Analizando do ponto de vista da proteção, ela é do tipo bloco, ou seja, proteções primárias e secundárias com relé direcional de sobrecorrente de neutro (67N) e relés de distância (21), que funcionam perfeitamente para os principais tipos de faltas (Mustafa, *et al.* 2013).

A linha estudada foi simulada no software OPENDSS®, o qual calcula o fluxo de GIC nos sistemas elétricos, independentemente de sua complexidade, sendo amplamente utilizado para este tipo de simulação. O software calcula a GIC na linha de transmissão considerando as latitudes e longitudes de seus terminais e os valores em V/km dos campos geoeletricos nas direções Norte (EN) e Leste (EE), respectivamente.

Ressalta-se que em (Horton, *et al.* 2012) pode-se observar como foram feitas as considerações destas parcelas no cálculo do fluxo da GIC, as quais determinam os cálculos das tensões induzidas nos terminais da linha e posterior análise da rede elétrica.

6.1 Dados da Linha

O comprimento total da LT é de 197 km, sendo esta composta por cabos do tipo CAA Lark 397.5, os quais apresentam resistência de 0,1703 Ω /km reatância indutiva de 0,3599 Ω /km (Nexans, 2000).

As latitudes e longitudes da Tabela 1 correspondem aos terminais da linha de transmissão dentro das respectivas subestações.

Tabela 1. Coordenadas esféricas.

Coordenadas/ Subestação	SMA 1	ALE ES
Longitude	53°47'30.20"O	55 46'13.58"O
Latitude	29° 39' 37.5 "S	29 47'1.78"S

A Figura 4 mostra a disposição da LT sobre o mapa do estado do Rio Grande do Sul, fornecida pelo software OPENDSS®, após a inserção de todos os dados do sistema. A imagem sobre a qual a LT está

disposta na Figura 4 foi obtida a partir do software Google Earth®.

A Tabela 2 mostra os valores do fluxo de GICs fornecido pelo software OPENDSS® de acordo com os parâmetros apresentados nesta seção. Além disso, o valor máximo de corrente, exigido como dado de entrada no OPENDSS®, foi delimitado em 100 Ampères. As correntes resultantes, mesmo com a variação do campo geoeletrico, respeitaram a corrente limite estabelecida e também o sentido real do fluxo de corrente, que, pela defasagem angular, se dá no sentido Santa Maria - Alegrete.

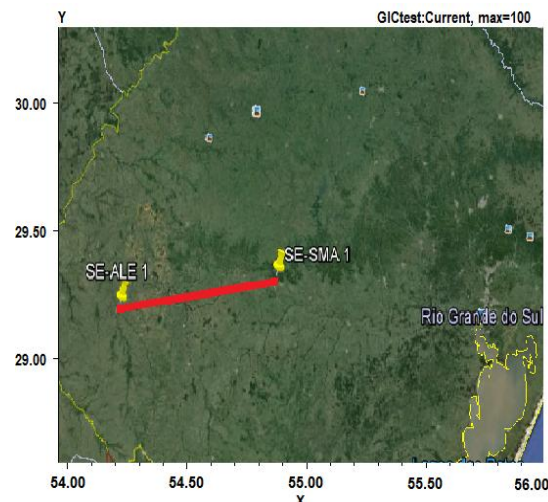


Figura 4. Localização da LT no Rio Grande do Sul.

Tabela 2. Fluxo de GIC na LT.

Campo Geoeletrico (V/Km)	Corrente na Linha (A)
1	5, 451
2	10, 902

Os dados apresentados na Tabela 2 têm como índice de referência o campo geoeletrico uniforme na direção Leste. O campo geoeletrico Norte não foi utilizado pois considerou-se a posição da linha de transmissão na localidade do hemisfério sul.

A frequência base para o cálculo destas correntes é 0,1 Hz. Este valor está de acordo com o exposto em (Pinto *et al.*,2003).

6.2 Sistema Simulado em EMTP-ATP®

O sistema teste proposto para simulação em EMTP-ATP® é exposto na Figura 5. Tal sistema é composto por uma linha de transmissão, a qual é representada por um bloco RLC trifásico, no qual foram inseridos os parâmetros da LT conforme a Seção 6.1.

Além disso, os geradores representam a carga e a fonte, representando as subestações ALE SE e SMA 1, respectivamente, conforme os ângulos de fase adotados para cada uma das fontes. Ainda, três fontes de corrente contínua foram conectadas a barra de SMA 1, uma para cada fase do sistema. Cada fonte insere um pulso de corrente contínua nas linhas de transmissão. A duração da GIC no sistema é deter-

minada pela atuação de uma chave de tempo controlado.

Os valores de GICs, fornecidos pelo OPENDSS[®] mostrados na Tabela 2, foram inseridos como amplitudes das fontes de corrente contínua do sistema simulado em software EMTP-ATP[®] (Figura 5), de modo a atender as características das GICs, tanto em magnitude, quanto em duração.

Os sinais de corrente obtidos nessas simulações, foram processados pela metodologia proposta, a qual foi capaz de extrair corretamente o valor da GIC correspondente, conforme mostrado na Seção 6.3.

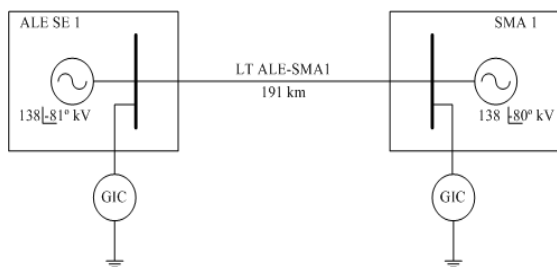


Figura 5. Sistema teste elaborado no software EMTP-ATP.

6.3 Resultados e Discussões

Os resultados expostos nas Figuras 6 e 8 correspondem a resposta da metodologia desenvolvida para os sinais obtidos através do EMTP-ATP[®]. Nessas Figuras, em a, são mostradas as formas de onda dos respectivos sinais e, em b, a resposta do filtro morfológico para detecção de GICs. Todas as correntes estão referenciadas ao primário dos TCs. Ambas as Figuras demonstram a eficiência da metodologia desenvolvida, visto que, nas situações analisadas, a técnica foi capaz de detectar o valor exato da GIC em questão.

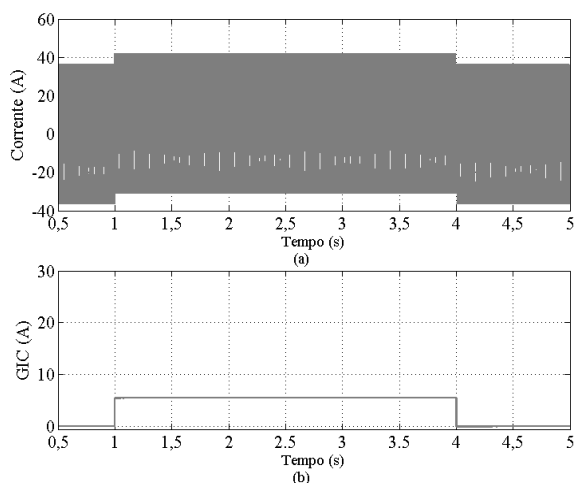


Figura 6. Resultados obtidos para uma GIC de 5,451 A. (a) Sinal de Corrente. (b) Resposta da metodologia de detecção de GICs.

A Figura 6(a) mostra o sinal de corrente gerado no EMTP-ATP[®], para uma taxa de amostragem de 96 amostras por ciclo com a influência de uma GIC de 5,451 A, com duração de 3 segundos.

Já a Figura 6(b) mostra a resposta do filtro que detectou o valor de 5,451 A durante o período de ação da GIC. Ainda, a Figura 7 mostra o detalhe do

sinal de corrente da rede no momento em que a GIC penetra no sistema.

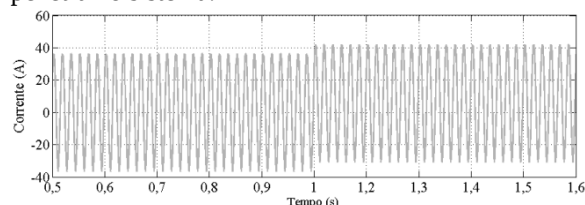


Figura 7. Detalhe do sinal de corrente com GIC de 5,451 A.

A Figura 8(a) mostra a forma de onda do sinal obtido a partir da simulação da ação de uma GIC de 10,902 A, também com duração de 3 segundos, no sistema teste analisado. Em b, é mostrada a resposta da metodologia de detecção de GICs. Novamente, a resposta da técnica proposta foi precisa, uma vez que foi detectada uma GIC de 10,902 A durante 3 segundos. O detalhe deste sinal, no momento da inserção da respectiva GIC, é exposto na Figura 9.

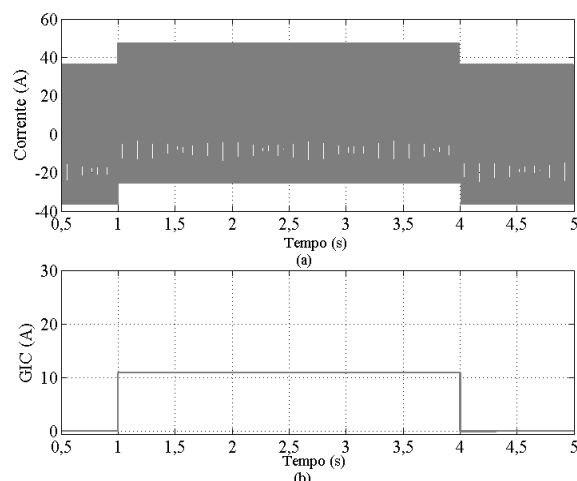


Figura 8. Resultados obtidos para uma GIC de 10,902 A. (a) Sinal de Corrente. (b) Resposta da metodologia de detecção de GICs.

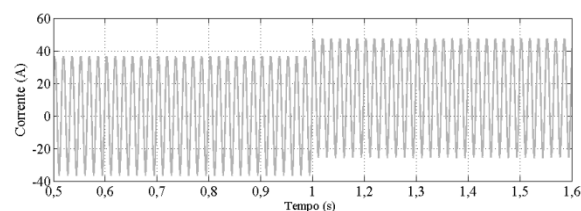


Figura 9. Detalhe do sinal de corrente com GIC de 10,902 A.

Os resultados demonstrados nesta Seção comprovam que a metodologia proposta é capaz de detectar adequadamente a ocorrência de GICs em sistemas elétricos de potência. Ressalta-se que, em condições de carregamento elevado, as GICs podem provocar a atuação indevida dos dispositivos de proteção, promovendo desligamentos não programados, os quais são passíveis de multa.

Logo, espera-se que, com a atuação da metodologia proposta, os problemas causados pelas GICs, tanto para o sistema elétrico quanto para as concessionárias de energia, sejam amenizados. Isso será possível a partir da criação de técnicas de bloqueio dos relés de proteção, as quais utilizem a resposta do filtro proposto como referência. Isto evitaria a atua-

ção indevida desses dispositivos durante a ocorrência dessas correntes. Por fim, ressalta-se que a resposta do filtro proposto poderá ser utilizada na elaboração de defesas das concessionárias de energia frente ao órgão regulamentador, quando estas forem multadas.

7 Conclusão

Este trabalho apresenta um estudo sobre as correntes geomagneticamente induzidas (GICs), as quais podem provocar a atuação indevida dos sistemas de proteção e reduzir a vida útil dos equipamentos do SEP, além de causar desligamentos não programados passíveis de punição por parte dos órgãos regulamentadores.

Além disso, foi apresentada uma técnica para detecção de GICs. Tal metodologia utiliza operadores da morfologia matemática, de modo a extrair o valor exato da GIC. A técnica proposta foi implementada em Matlab® e testada para sinais de corrente obtidos a partir de simulações de um sistema teste nos softwares OPENDSS® e EMTP-ATP®.

Os resultados obtidos a partir do processamento desses sinais comprovaram a boa capacidade de detecção de GICs da técnica proposta.

Portanto, espera-se que a contribuição deste trabalho possa melhorar a confiabilidade da proteção durante a ocorrência das GICs, evitando desligamentos não programados ocasionados pela atuação indevida dos relés, além de prover mecanismos de defesa às concessionárias de energia frente às severas punições impostas pelos órgãos regulamentadores.

Referências Bibliográficas

- Boteler, D. H., Pirjola, R. J. and Nevanlinna, H.; The effects of geomagnetic disturbances on electrical systems at the Earth's surface; *Adv. Space. Res.*, 22(1), 17-27, 1998.
- Cardoso, A. H., "Análise de Alguns Parâmetros Ionosféricos na Anomalia Geomagnética do Atlântico Sul Mediante Ondas "VLF"", *Revista Brasileira de Física*, Vol. 12, NP 2, (1982)).
- Dos Santos, E. M., Cardoso G., Jr., P. E. Farias, and DE MORAIS A. P.; CT Saturation Detection Based on the Distance Between Consecutive Points in the Plans Formed by the Secondary Current Samples and Their Difference-Functions; *IEEE Transactions on power delivery*, vol. 28, no. 1, Janeiro 2013.
- Fuchs, Marcius G.; "Análise dos desarmes ocorridos na LT 138kV SMA1 X ALE- com vistas às ações de manutenção", Technical report in portuguese, CEEE-GT. August, 2011.
- Girgis, R.. Effects of GIC on Power Transformers and Power Systems", *IEEE Spectrum*, December 2012
- Horton, R., Boteler, D., Overbye, T. J., Pirjola R., Dugan, R., A Test Case for the Calculation of Geomagnetically Induced Currents. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 27, no. 4, october 2012.
- Kappenman, J. G., Zanetti, J. H. e Radasky, W., "Geomagnetic Storms Can Threaten Electric Power Grid", *Earth in Space*, vol. 9, n° 7, Março 1997.
- Moore, S. K.; "Extreme Solar Storm Strikes Earth, *IEEE Spectrum*, Dezembro 2003. 'NASA. Anomalia do Atlantico Sul', [Online] Disponível em: <://www.ceticismoaberto.com/fortianismo/1053/a-anomalia-do-atlantico-sul>. Acesso em: 22 mar. 2015.
- Mustafa, T. I. A. H.; Cabral, S. H. L.; L. B. Puchale, M.G. Fuch, L.E.C. Lima and F. T. Flores; "A Study of Correlation between Protection Trips and Geomagnetically Induced Currents in a Power Transmission Line in Brazil", *IEEE Spectrum*, December 2013.
- Nexans, C., "Condutores Nus", 2000. Disponível em: <://www. Nexans.com.br. > . Acesso em: 02 Abril. 2016.
- Pereira, Oneide José; Leithold, Ângelo Antônio. "Geomagnetismo. Instituto de aeronáutica e espaço – IAE", Campus de pesquisas geofísicas major Edsel de Freitas Coutinho. São Paulo, 2012.
- Pinto, L.M.V.G., Szczupak, J., Drummond, M.A. e Macedo, L.H.; "Um Novo Olhar sobre a Segurança de Sistemas Elétricos", *IEEE Latin America, Region 9 - Brazil Council*, 2003.
- Russelli, C. T. e Luhmann, J. G., "Earth: Magnetic Field and Magnetosphere, *Encyclopedia of Planetary Sciences*", Chapman and Hall, Nova Iorque, 1997.
- Wu, Dr. Q.h.; LU, Dr. Z.; T.Y., Ji. Protective Relaying of Power Systems Using Mathematical Morphology: Power Systems. Liverpool: Springer-verlag London Limited, 2009.