

EFEITOS CAUSADOS POR CORRENTES GEOMAGNETICAMENTE INDUZIDAS EM TRANSFORMADORES DE CORRENTE E RELÉS DE DISTÂNCIA DO TIPO MHO

FÁBIO K. SCHONS, ANA P. P. LORENZONI, EDUARDO M. DOS SANTOS,
PAULO R. F. MARQUES, ALEX ITCZAK, GABRIELI P. PIZZOLATO, FERNANDA C. RAMOS

*Grupo de Energia e Sistemas Elétricos de Potência, Pesquisa, Universidade Federal do Pampa
Av. Tiaraju, 810 - Ibirapuitã, Alegrete - RS, 97546-550*

*E-mails: fabioschons@hotmail.com, applorenzoni@gmail.com,
eduardosantos@unipampa.edu.br, prfmarques2@gmail.com,
alex.itczak@gmail.com, gabipp01@gmail.com, fernanda.cazabonet@gmail.com*

Abstract— Geomagnetically Induced Currents (GICs) are associated with solar flares, whose ionized particles travel in space and interact with the Earth's magnetosphere, moving at high altitudes and producing mirrored currents on the planet's surface. These currents flow through paths parallel to the ground, including transmission lines (TLs), and can penetrate current transformers (CTs) and relays via grounding. GICs have very low frequencies with average magnitudes between 0 and 15A, with peaks of up to 100A and durations from milliseconds to minutes. It is speculated that GICs are the cause of several undue disconnections that occurred in Brazil, due to the South Atlantic Anomaly present in the magnetosphere. Thus, this work aims to investigate the impact of GICs on the performance of distance relays and CTs. For this, a TL, a CT and a relay were modeled and simulated in different situations. A circuit was implemented in the EMTP-ATP software for analysis involving the circulation of GICs. It was concluded that the GICs, depending on their intensities, can cause instantaneous action. As for the performance of the CT, it is stated that it saturates in a few cycles for low frequency currents.

Keywords— Geomagnetically Induced Currents, Terrestrial Magnetic Field, South Atlantic Anomaly, Distance Relays, Transmission Line, Protection of the Electric Power System.

Resumo— Correntes Geomagneticamente Induzidas (GICs) estão associadas às erupções solares, cujas partículas ionizadas viajam no espaço e interagem com a magnetosfera da Terra, entrando em movimento em altas altitudes e produzindo correntes espelhadas na superfície do planeta. Essas correntes fluem através de caminhos paralelos ao solo, incluindo as linhas de transmissão (LTs), podendo penetrar em transformadores de corrente (TCs) e relés via aterramento. As GICs têm frequências muito baixas com magnitudes médias entre 0 e 15 A, com picos de até 100 A e durações de milissegundos até minutos. Especula-se que as GICs sejam a causa de desligamentos indevidos ocorridos no Brasil, devido a Anomalia do Atlântico Sul da magnetosfera. Assim, este trabalho busca investigar o impacto das GICs no desempenho dos relés de distância e dos TCs. Para isso uma LT, um TC e um relé foram modelados e simulados em diferentes situações. Um circuito foi implementado no *software* EMTP-ATP para análise envolvendo a circulação de GICs. Pôde-se concluir quanto ao relé que, dependendo de suas intensidades, as GICs podem provocar a atuação instantânea. Já quanto ao desempenho do TC, afirma-se que o mesmo satura em poucos ciclos para correntes de baixa frequência.

Palavras-chave— Correntes Geomagneticamente Induzidas, Campo Magnético Terrestre, Anomalia do Atlântico Sul, Relés de Distância, Linha de Transmissão, Transformadores de Corrente, Proteção do Sistema Elétrico de Potência.

1 Introdução

O Sistema Elétrico de Potência (SEP) é definido como todos os meios e processos onde a energia é submetida até as residências. Logo, o contínuo fornecimento é essencial para a qualidade da energia. Assim, o SEP assume grande importância nos dias atuais. Porém, existem uma série de eventos que prejudicam suas funções, como, por exemplo, o curto-circuito. Na presença de uma situação faltosa, elevadas correntes podem danificar equipamentos do sistema, podendo afetar os consumidores e todos os envolvidos no SEP. Dessa forma, é necessário um sistema de proteção eficaz e pontual, capaz de operar no momento e local correto do evento prejudicial. Entretanto, especula-se que os sistemas de proteção possam atuar indevidamente para eventos que envolvam correntes geomagneticamente induzidas (Mustafa et al., 2013).

As GICs são correntes espelhadas na superfície terrestre em função da movimentação de partículas ionizadas na magnetosfera do planeta. Essas partículas ionizadas são provenientes das explosões solares e, quando em contato com o campo magnético terrestre, deformam as linhas de campo, migrando de uma linha para outra no sentido das longitudes e induzindo diferentes potenciais sobre o solo. Tais correntes apresentam caráter quase contínuo (frequências abaixo de 1

Hz), com durações e amplitudes aleatórias (Heindl et al., 2011). O fenômeno das GICs é bastante estudado no Hemisfério Norte, uma vez que o engarrafamento nas linhas de campo magnético terrestre nas proximidades dos polos favorece a ocorrência de GICs. No Canadá, alguns blecautes, comprovadamente, foram causados pela circulação de GICs no SEP. Dessa forma, até então, acreditava-se que as GICs fossem um fenômeno associado apenas às altas latitudes. Entretanto, com a influência da Anomalia Geomagnética do Atlântico Sul (AGAS), passou-se a acreditar que tais fenômenos possam ocorrer nas regiões intertropicais, incluindo o Brasil (Mustafa et al., 2013).

Nesse contexto, com o objetivo de comprovar a ocorrência das GICs no SEP, diversos trabalhos sobre o tema já foram publicados na literatura especializada, discutindo suas consequências no SEP (Girgis et al., 2012) (Heindl et al., 2011) (Lagoas, 2014) (Lorenzoni, 2017) (Mustafa, 2013). Em vista disso, um sistema teste com os parâmetros da linha de transmissão entre as cidades de Alegrete e Santa Maria ALE SE-SMA, foi desenvolvido e implementado no *software* EMTP-ATP, o qual permite a inserção de correntes contínuas e alternadas de frequências muito baixas, com duração controlada, as quais circulam na linha de transmissão, simulando a ocorrência de GICs. Desse sistema teste, foram obtidos os sinais de corrente e tensão da rede, bem como as correntes no

secundário do TC. Assim, o desempenho do TC foi testado através da medição das correntes de magnetização e das correntes entregues a carga conectada em seus terminais secundários. Já o desempenho do relé foi avaliado através do processamento dos sinais de tensão e corrente pela lógica do relé de distância ANSI 21, tipo Mho, a qual foi implementado no *software Matlab*. O relé testado foi apenas para ilustrar o que acontece, em trabalhos futuros pretende-se testar outros filtros. Mais informações sobre os sistemas teste podem ser encontrados em Lagoas (2014) e Lorenzoni (2017).

Por fim, destaca-se a importância desse estudo uma vez que, com o crescimento do sistema elétrico, surge uma crescente preocupação das concessionárias com o fornecimento contínuo de energia elétrica e com a durabilidade de seus equipamentos. Sendo assim, é de suma importância que a proteção do sistema elétrico funcione corretamente, sem atuações indevidas, haja visto que a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) avalia as concessionárias em diversos aspectos do fornecimento, como a qualidade dos serviços prestados, o que compreende a avaliação das interrupções ocorridas no sistema. Nesse contexto, visto que, com a ocorrência de desligamentos não programados e sem justificativa, as concessionárias de energia elétrica são severamente multadas pela ANEEL, torna-se fundamental a avaliação dos efeitos das GICs no SEP.

2 Fundamentação Teórica

2.1. Explosões Solares

Explosões solares, ou erupções solares, ocorrem constantemente na superfície solar. Devido a intensa instabilidade no seu campo magnético, a superfície externa do Sol é muito instável. Essa instabilidade pode ser vista pelas manchas presentes na sua camada externa. As manchas solares são mais intensas dependendo do ciclo solar, que têm uma duração aproximada de dez a onze anos. Quando há um aumento das manchas solares, a probabilidade dessas tempestades aumenta, o que, por sua vez, influencia o campo magnético terrestre.

Esse tipo de evento magnético é causado pelas massas coronais lançadas durante as erupções, as quais são compostas por hidrogênio e hélio ionizados. No momento em que ocorre uma explosão, o vento solar lança no espaço uma nuvem de partículas carregadas a uma velocidade de 300 a 400 quilômetros por segundo, com uma temperatura de, aproximadamente, um milhão de graus Celsius na superfície do Sol.

Em casos mais intensos, quando ocorrem as erupções solares de grandes proporções, o vento solar é capaz de expelir milhões de partículas carregadas, e, atingindo a atmosfera terrestre, esse fenômeno é responsável por comprimir a magnetosfera da Terra que está voltada ao Sol, estendendo a região noturna (Kappenman et al., 2012). Na Figura 1, está representado esse evento.

As auroras boreais são ocasionadas pela interação de partículas ionizadas aprisionadas na magnetosfera terrestre. A fonte de energia da aurora é obtida pelos ventos solares, tais ventos podem conduzir eletricidade, assim como a magnetosfera terrestre (Correia et al., 2017).

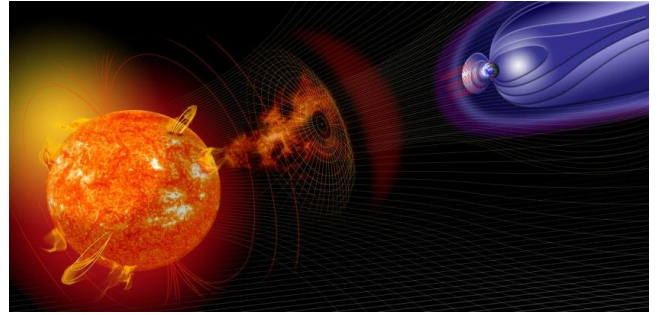


Fig 1. Magnetosfera da Terra sendo atingida por erupções solares. Fonte: Hype Science (2019).

As partículas provenientes dos ventos solares seguem uma trajetória espiral ao longo das linhas de campo, em direção aos polos magnéticos da Terra. Com esse movimento, as partículas ionizadas produzem corrente elétrica em altas latitudes, sendo estas espelhadas na superfície terrestre. Conforme as leis de indução eletromagnética, essas correntes são conhecidas como GICs (do inglês *Geomagnetically Induced Currents*), de acordo com Correia et al. (2017).

2.2. Correntes Geomagneticamente Induzidas

Conforme já mencionado, GICs são correntes espelhadas na superfície da Terra, que ocorrem em função do movimento de partículas ionizadas no campo magnético terrestre. Ao entrarem no campo magnético da Terra, essas partículas deformam o referido campo, o qual tem sua intensidade medida através de magnetômetros (Pinto et al, 2008; Pirjola, 2000).

Além da análise por harmônicos esféricos, o campo geomagnético pode ser determinado pelo uso de índices geomagnéticos. Os índices geomagnéticos fornecem informações sobre as atividades geomagnéticas e as perturbações na magnetosfera associadas às variações ocorridas no Sol. A partir do uso de magnetômetros espalhados pelo globo, os dados são obtidos e podem ser utilizados como referência em estudos envolvendo GICs. Entre todos os índices, existem três principais para determinar a intensidade e a duração das tempestades geomagnéticas sendo estes o Auroral Electrojet (AE), o Disturbance Storm Time (Dst) (Masahito, 1990) e o Planetarische Kennziffer (Kp) (NASA-NOAA, 1982).

As principais consequências das GICs sobre o Sistema Elétrico de Potência, no que diz respeito a continuidade e fornecimento de energia, são as falhas nos equipamentos de proteção, causadas pelos desligamentos indevidos decorrentes de sobrecargas. Além disso, GICs provocam a saturação de transformadores, que, a longo prazo, desgastam os isolamentos e podem provocar danos permanentes a estes equipamentos, bem como a outros componentes do sistema. Embora as GICs apresentem variações, elas podem ser classificadas como correntes quase contínuas, com frequências abaixo de 1 Hz (Pinto et al, 2008) (Ramírez-Ni, 2016).

Ressalta-se ainda que as GICs são mais estudadas no Hemisfério Norte, onde já se comprovaram diversos blecautes devido ao fenômeno. Canadá e Estados Unidos, e também países escandinavos, gastam bilhões de dólares em monitoramento e prevenção dos problemas causados pelo evento geomagnético. Órgãos como o NOAA e a NASA emitem boletins periódicos ao setor elétrico alertando para o risco da pre-

sença de GICs. Por fim, cabe ressaltar que esse evento é de difícil previsão e detecção (Pinto et al., 2008).

2.3. Anomalia Geomagnética do Atlântico Sul

As tempestades geomagnéticas podem causar variações no campo magnético de 1000 a 2000 nT em latitudes auroras. Já em latitudes equatoriais, esta variação é menor, sendo essa em torno de 200 a 300 nT (Mustafa et al., 2013). Embora menos intensas nas latitudes equatoriais, especula-se que as tempestades geomagnéticas influenciem a superfície terrestre dessa região em decorrência da Anomalia Geomagnética do Atlântico Sul (AGAS). Logo, acredita-se que um dos motivos para diversos desligamentos da rede elétrica ocorridos sem explicação no Brasil teriam origem em fenômenos geomagnéticos, justamente em decorrência desta anomalia que compreende grande parte do país.

Há quase 200 anos, dados obtidos por uma rede de observatórios possibilitaram a elaboração de cartas e modelos cada vez mais precisos da variação do campo geomagnético terrestre. Em meados do século XX, comprovou-se, através de mapas magnéticos, a presença da AGAS (Chapman e Bartels, 1940). Na Figura 2, está destacado, em azul, a zona compreendida pela Anomalia Geomagnética do Atlântico Sul.

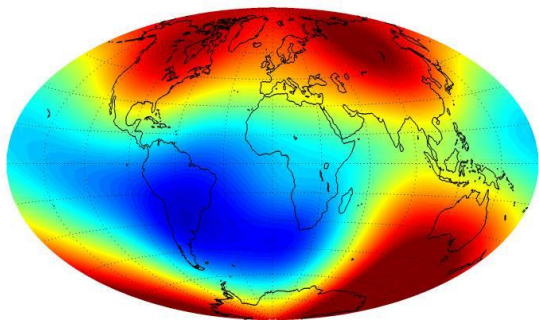


Fig 2. Anomalia Geomagnética do Atlântico Sul. Fonte: NASA (2014).

2.4. Proteção do Sistema Elétrico de Potência

Um dos efeitos mais graves gerados pela presença de GICs é a excitação CC nos transformadores, uma vez que o circuito magnético pode ser rompido pela GIC, que possui frequência de uma corrente quase contínua. O campo magnético é produzido pelo pulso eletromagnético que desloca o ponto de operação do circuito magnético, ocorrendo a saturação do núcleo. Isso pode levar à produção de correntes harmônicas, distorcendo tensões e provocando a atuação dos relés de proteção. A saturação pode ainda provocar o aquecimento localizado do núcleo e dos enrolamentos, que, por sua vez, pode produzir incêndios ou explosões espontâneas, assim como perfurações ou degradações na isolamento (Girgis et al., 2012).

A Figura 3 mostra um Transformador de Potência (TP) danificado pela saturação de seu núcleo, o qual é propriedade da *Public Service Electric and Gas* (PSEG), localizado na *Salem Nuclear Generating Station* em *New Jersey*. Esse TP foi queimado pelas GICs, após a tempestade geomagnética de 1989. Este tipo de situação é um exemplo do que pode acontecer em TCs. No mesmo ano, ocorreram blecautes na província de Quebec, no Canadá, e outros no estado de Nova Jersey, nos Estados Unidos.

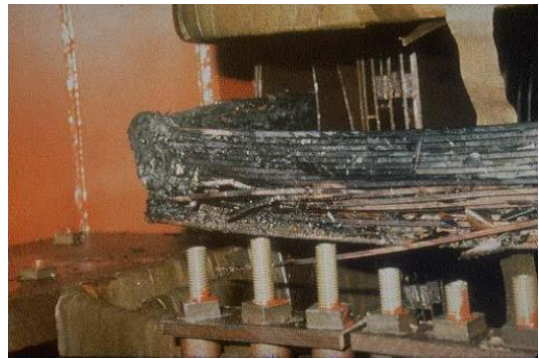


Fig 3. Transformador de potência com núcleo saturado. Fonte: Girgis et al., 2012.

Com o elevado número de falhas nos componentes do SEP, tem-se uma redução da qualidade de energia e da confiabilidade do serviço prestado. O curto-circuito é o evento mais comum nesse tipo de falhas que afetam o SEP, seja este ocasionado pelo contato acidental ou proposital entre condutores sob potenciais diferentes, ou pelo contato entre apenas um condutor e o solo. Essa falta produz elevadas correntes, que circulam em todos os elementos energizados do SEP. Esses eventos ocorrem de maneira aleatória nos sistemas de potência com consequências severas, provocando danos irreversíveis a seus componentes e às instalações das unidades consumidoras, caso não sejam eliminados pelos dispositivos de proteção (Santos, 2015).

Assim, as proteções mais utilizadas no Sistema Elétrico de Potência são proteção de geradores, transformadores, barramentos e linhas, sendo os relés, disjuntores e os transformadores de corrente e potencial os componentes responsáveis pela supervisão das faltas no sistema. Embora sejam projetados para atuarem apenas em situações faltosas ou de sobrecarga do sistema, os dispositivos de proteção podem atuar para a circulação de GICs, desligando trechos do sistema sem causa aparente, sendo estes desligamentos justificados como eventos de força maior. Destaca-se que as concessionárias são severamente punidas pelos órgãos reguladores no Brasil para desligamentos não programados e sem justificativa.

3 Metodologia

Para análise do desempenho dos dispositivos estudados neste trabalho foi utilizado como base a linha de transmissão de 138 kV, entre as cidades de Alegrete e Santa Maria ALE SE-SMA, com 197 km de comprimento, a qual está representada na Figura 4.

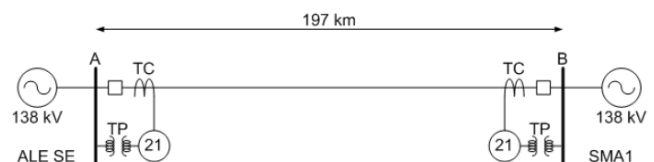


Fig 4. Representação Unifilar da LT.

Os sistemas teste propostos foram fundamentados no circuito da Figura 4 e simulados no *software* EMTP-ATP. Tais sistemas são compostos pela linha de transmissão, a qual é representada por um bloco RLC, com fontes equivalentes em ambos os terminais representando as subestações ALE SE e

SMA1, sendo estas de 138 kV. A defasagem entre as fontes foi variada de -60° a 60° , com passo de 15° de modo a estabelecer o sentido e as magnitudes do fluxo de potência. Ao terminal da barra B, foi conectado um TC C400 com relação de transformação 2000:5 A, composto por um transformador ideal, com um indutor tipo-96 conectado em paralelo aos seus terminais secundários e um ramo RLC representando a impedância equivalente do TC referida ao secundário.

O ramo de magnetização do TC é representado pelo referido indutor, para o qual foi estipulada uma curva de excitação, gerada no próprio *software* EMTP-ATP, para um ponto de joelho com coordenadas de 2,05 A e 1,51 V, de corrente de excitação e tensão secundária de excitação, respectivamente. A curva de excitação gerada no EMTP-ATP pode ser vista na Figura 5.

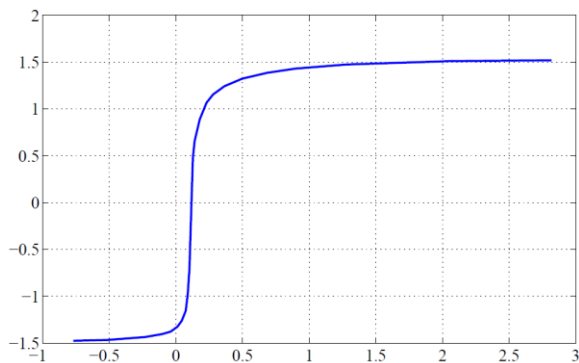


Fig 5. Curva de excitação do TC utilizado nos sistemas teste.

É importante ressaltar que a característica de excitação foi gerada pela rotina HYSDAT do modelo de indutor tipo-96 do EMTP-ATP permitindo o controle do fluxo remanescente CA no núcleo do TC, o qual foi desprezado nos testes pelo fato das GICs apresentarem frequências muito baixas (quase contínuas). Por fim, a carga do TC (relé) é representada por um bloco RLC com impedância de 4Ω e fator de potência unitário, simulando um relé digital. Os parâmetros dos sistemas teste são apresentados nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1. Parâmetros do TC.

Transformador de Corrente	
RTC	2000:5
Ponto de Joelho	2,05 A e 1,51 V

Tabela 2. Parâmetros da LT.

Linha de Transmissão	
Comprimento (km)	197
R_{L0} CA, 60 Hz a 75°C (Ω/km)	0,1703
Reatância Indutiva X_{L0} (Ω/km)	0,3599
Reatância Capacitiva X_{C0} (S/m)	0,2187

3.1. Análise do Desempenho do TC Sob Influência de GICs

Para análise do desempenho do TC sobre influência das GICs, foi desenvolvido o sistema teste exposto na Figura 6. Nesse sistema, uma corrente com duração controlada é acrescentada a corrente de carga na linha de transmissão, através de uma fonte de corrente contínua ou alternada de baixa frequência. Foram feitas simulações para diversos valores de

GIC com diferentes frequências. Dessas simulações, foram obtidos os sinais de corrente secundária total, de corrente de magnetização e de corrente na carga de um TC, os quais foram analisados de modo a verificar a capacidade do TC de reproduzir as características do respectivo sinal no primário para sua carga (relés de proteção, por exemplo).

Para forçar a circulação da GIC pelo primário do transformador, a impedância das fontes e da linha de transmissão foram acumuladas no bloco RLC conectado à fonte do terminal de saída do primário do transformador. O bloco RLC conectado ao terminal primários de entrada do transformador representa uma impedância infinitesimal, cujas quedas de tensão são desprezíveis, a qual foi inserida no circuito apenas para auxiliar ao programa com relação a divisão de corrente acrescida ao sistema, evitando assim um ponto flutuante. Na Figura 6 (a), é apresentado o sistema teste para simulação da circulação de GIC contínua, enquanto em (b) tem-se o circuito para circulação de GIC alternada.

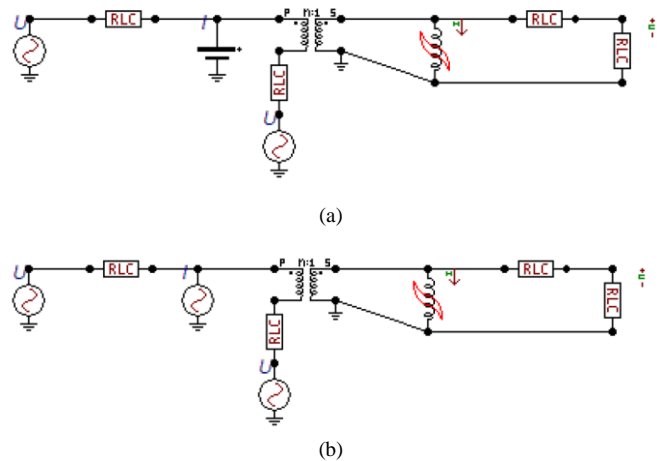


Fig 6. Sistema teste desenvolvido para simular a GIC circulando na LT. (a) Sistema teste para simulação da circulação de GIC contínua (b) Circuito para circulação de GIC alternada.

3.2. Circuito para Análise do Desempenho de Relés de Distância Sob Influência das GICs

Para análise do desempenho do relé de distância em situações envolvendo GICs, foram obtidos os sinais de tensão primária no ponto de instalação do relé e os sinais de corrente no secundário do TC, os quais foram devidamente processados pela lógica do relé tipo *Mho*, que foi implementada no *software* Matlab®. Valendo-se do princípio da superposição, primeiramente, foi desenvolvido o sistema teste, exposto na Figura 7, onde, em (a), tem-se o circuito para simulação da corrente de carga circulando através da linha de transmissão. Já no circuito da Figura 7 (b), tem-se o modelo de simulação da passagem da GIC pelo relé, adicionando-se uma fonte de corrente contínua ou alternada de baixa frequência em série com o bloco RLC, o qual representa a impedância do relé. Assim, os sinais de corrente secundária dos circuitos a e b são somados, gerando a corrente secundária total.

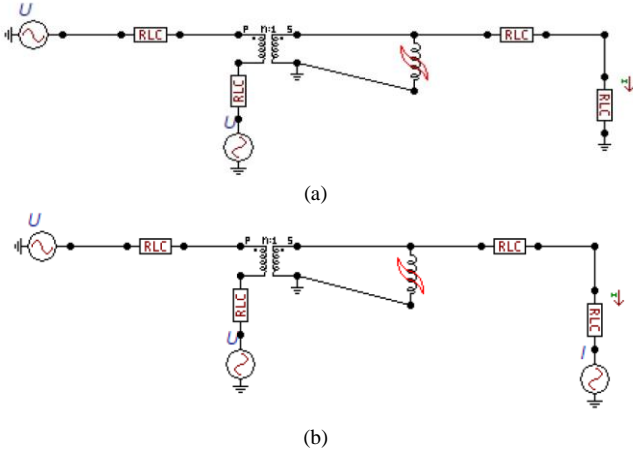


Fig. 7. Sistema teste. (a) Simulação da corrente de carga circulando através da linha de transmissão. (b) Modelo de simulação da passagem da GIC.

Após a obtenção das formas de onda de corrente e tensão, foi criado um banco de dados no *software* Matlab®, com a finalidade de organizar as informações e armazená-las para a posterior utilização no processamento da lógica do relé. Assim, os referidos sinais foram gerados, simulando GICs com diferentes amplitudes e frequências. Para cada valor de magnitude e frequência da GIC, foram aplicadas defasagem entre as fontes de tensão, manipulando assim a magnitude da corrente de carga e o sentido do fluxo de potência.

A implementação da lógica do relé foi feita com base nas seguintes etapas: A etapa de aquisição de dados corresponde a fase de amostragem do sinal, na qual é utilizada uma janela móvel de dados para cada um dos sinais envolvidos, com N amostras, a qual é atualizada a cada valor dos respectivos sinais de corrente e tensão. A cada nova amostra, o primeiro valor da janela de dados anterior (extremidade esquerda) é descartado e os demais são deslocados para a esquerda, sendo a amostra atual alocada na última posição da janela (extremidade direita), permitindo assim o processamento de todo o intervalo do respectivo sinal. Ressalta-se que o número de amostras na janela de dados corresponde ao número de amostras por ciclo, o qual é dado pela frequência de amostragem.

Na etapa seguinte, ocorre a estimação dos fasores a partir de um filtro de Fourier de ciclo completo, o que justifica a utilização da janela de dados com N amostras. Tal filtro foi implementado conforme Santos (2015), sendo capaz de extrair os valores instantâneos de módulo e ângulo dos sinais amostrados para fasores na frequência fundamental, sem lógica para extração da componente unidirecional exponencialmente declinante das correntes de curto-circuito.

A estimação fasorial se faz necessária pois o cálculo da impedância vista pelo relé para cada *loop* de falta é feito em função dos fasores de tensão e corrente eficazes em 60 Hz. Os sinais de tensão e corrente são processados pelo filtro e os fasores resultantes são então passados a lógica do relé, a qual calcula a impedância vista para cada *loop* de falta. As Equações 1 e 2 representam as impedâncias vistas pelos *loops* AN e AB, sendo que, para os demais *loops* de falta, os parâmetros de corrente e tensão são substituídos pelos parâmetros correspondentes das respectivas fases envolvidas. Em (1), k_0

é dado pela Equação 3 e representa o fator de correção em função da corrente residual I_R .

$$Z = \frac{V_A}{I_A + k_0 \times I_R} \quad (1)$$

$$Z = \frac{V_A - V_B}{I_A - I_B} \quad (2)$$

$$k_0 = \frac{Z_{0L} - Z_{1L}}{3 \times Z_{1L}} \quad (3)$$

Em (3), Z_{0L} e Z_{1L} representam as impedâncias de sequência zero e positiva, por km, da linha de transmissão. V_A , V_B e V_C representam os fasores de tensão para as fases A, B e C. Analogamente, I_A , I_B e I_C representam os fasores de corrente para as fases A, B e C.

O relé Mho implementado foi ajustado para atuar instantaneamente quando a impedância calculada para o respectivo *loop* for vista dentro da região circular delimitada pela impedância de ajuste. Para a primeira zona (instantânea), esse ajuste equivale a 80% da impedância total da linha. Para atuação da segunda ou terceira zona, a impedância deve permanecer dentro da respectiva zona por, pelo menos, 0,3 s para a segunda zona e 0,6 s para a terceira zona. Quando qualquer das condições mencionadas é satisfeita, ocorre o *trip* do relé, isto é, um sinal é enviado para a abertura do disjuntor.

4 Resultados e Discussão

4.1. Influência das GICs sobre os TCs

Para analisar a influência das GICs sobre os TCs, diversos parâmetros da simulação foram variados. Nesse contexto, alguns dos resultados obtidos são apresentados a seguir, para uma taxa de amostragem de 16 amostras por ciclo. A Figura 8 apresenta o sinal de corrente secundária total, o qual deveria passar pela carga do TC apenas com erro de transformação equivalente à corrente de magnetização do núcleo.

No entanto, na Figura 9, pode-se perceber que a circulação da componente contínua de 20 A (GIC) no primário do TC provoca a saturação do mesmo em poucos milissegundos, causando a distorção na forma de onda do sinal de corrente repassado a sua carga. Ressalta-se que após o fim da interferência da GIC, o TC segue distorcendo a forma de onda repassada a sua carga até que o fluxo CC remanescente seja eliminado do núcleo, retornando a sua operação normal após 0,307 segundos após o fim da circulação da GIC.

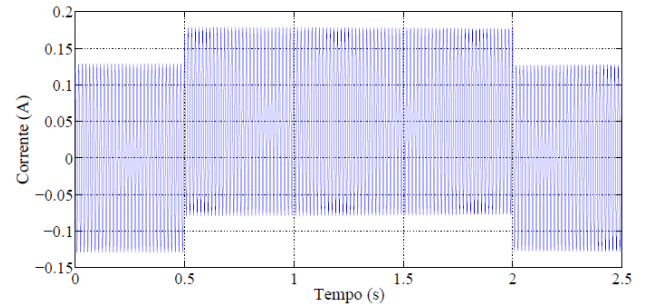


Fig. 8. Sinal de corrente secundária total para GIC de 20 A no primário com duração de 1,5 segundos.

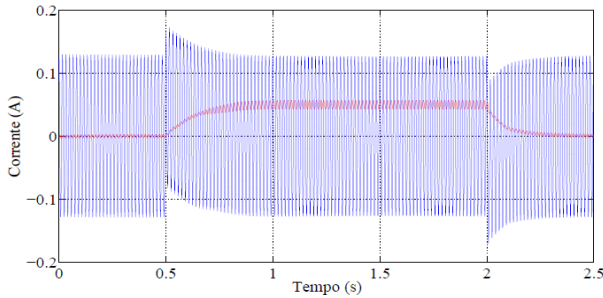


Fig 9. Sinal de corrente secundária na carga do TC (azul) e corrente no ramo de magnetização (vermelho) para GIC de 20 A no primário do TC.

Além disso, através das Figuras 10 e 11, pode-se observar a saturação do TC decorrente de uma GIC de caráter senoidal circulando no primário do TC, com amplitude igual a 40 A. Nota-se, novamente, que a maior parte da componente gerada pela GIC circula no ramo de magnetização do TC. A forma de onda de corrente entregue a carga do TC mantém-se distorcida durante todo o intervalo de tempo em que a GIC permanece no sistema.

O efeito da GIC permanece até que o fluxo remanescente seja eliminado do núcleo do TC, o qual retorna a sua operação normal após 0,2 segundo do fim da atuação da GIC no circuito.

4.2. Influência das GICs sobre o Relé de Distância

Para analisar a influência de GICs sobre a atuação do relé de distância, diversos parâmetros da simulação foram variados. Nas Figuras 12 a 15, são mostrados os resultados obtidos para uma GIC de frequência 0,1 Hz e amplitude de 7,5 A, para uma amostragem de 16 amostras por ciclo. Nesse caso, a atuação do relé ocorre nos loops BN e CN. Assim, a Figura 16 mostra a atuação para o loop BN.

Para outras amplitudes de GIC testadas, independentemente da frequência da mesma, observam-se desempenhos semelhantes, ocorrendo atuação do relé de distância para os loops de falta à terra, nos casos em que as amplitudes das GICs são maiores ou iguais a 5 A, para GICs contínuas. Entretanto, para as GICs de caráter alternado, nenhuma atuação foi verificada para amplitudes inferiores a 7,5 A.

A Figura 12 (a) mostra os sinais de tensão das três fases, refletidos ao secundário dos TPs. Ainda, a Figura 12 (b) mostra os sinais de corrente referidos ao secundário dos TCs, já com a GIC somada. Todos os sinais de tensão e corrente da rede são processados pelo filtro de Fourier de ciclo completo para a obtenção de seus valores RMS, os quais são utilizados na lógica do relé para o cálculo da impedância aparente. Já a Figura 12 (c), corresponde ao sinal da GIC inserida em 0,5 segundo, com duração de 1 segundo.

Na Figura 13 são demonstrados os valores RMS de sinais de tensão das fases A, B e C, respectivamente. Como no caso anterior o sinal de tensão não foi afetado pela GIC. Os valores RMS de sinais de corrente nas fases A, B e C, conseguidos através do filtro de Fourier, podem ser observados na Figura 14. Nela, pode-se observar os picos nos instantes em que o efeito da GIC se inicia e se encerra. Novamente, isto ocorre devido ao erro de convergência da resposta do filtro de Fourier nos instantes em que a magnitude da corrente aumenta repentinamente.

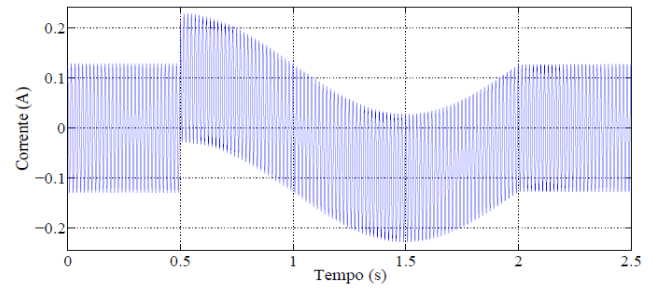


Fig 10. Sinal de Corrente secundária total para GIC de 40 A com frequência de 0,5 Hz e duração de 1,5 segundos.

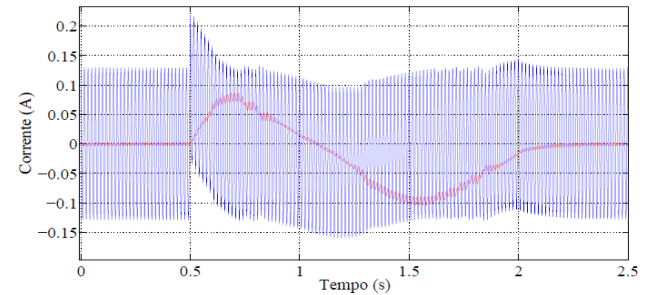


Fig 11. Sinal de corrente secundária na carga do TC (azul) e corrente no ramo de magnetização (vermelho) para GIC de 40 A com frequência de 0,5 Hz.

Na Figura 15, *loop* BN, pode-se observar o momento que a impedância entra nas respectivas zonas de proteção e quanto tempo essa permanece em cada uma. O ponto em vermelho representa o instante em que ocorre *trip*. Percebe-se que a impedância não se mantém tempo suficiente na segunda e terceira zona para que ocorra o *trip*. Contudo, quando a impedância entra na primeira zona o mesmo atua imediatamente. No *loop* AN ocorre o *trip* no momento que a GIC sai do sistema. Já no *loop* BN e CN ocorre o *trip* no momento que a GIC entra no sistema. Isso reforça a ideia de que o relé atua devido ao erro de convergência do estimador de fasores.

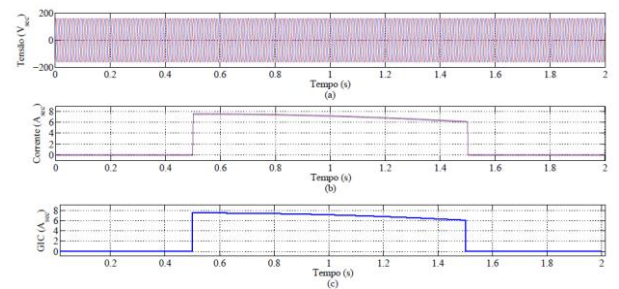


Fig 12. Sinais resultantes da simulação de GIC com frequência de 0,1 e amplitude de 7,5 A. (a) Sinais de tensão trifásica secundária (b) sinais de corrente trifásica total fornecido no secundário do TC (c) sinal da GIC.

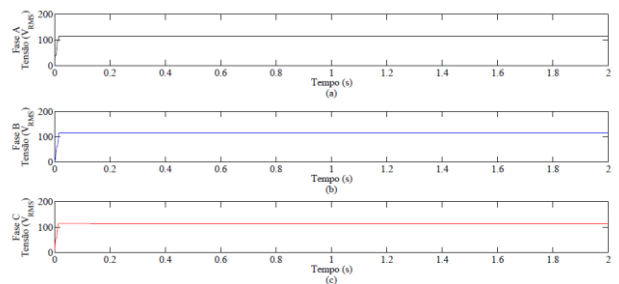


Fig 13. Resposta do estimador de fasores para os sinais de tensão de cada fase GIC com frequência de 0,1 e amplitude de 7,5A.

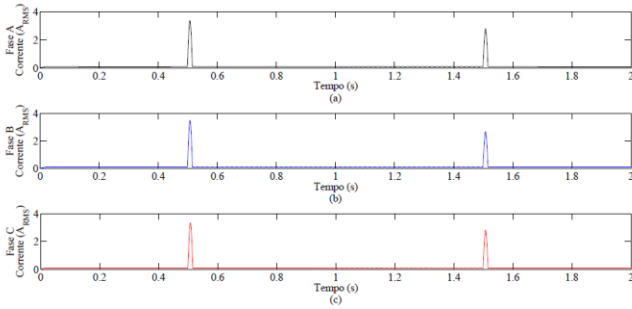


Fig 14. Resposta do estimador de fasores para os sinais de corrente de cada fase GIC com frequência de 0,1 e amplitude de 7,5 A.

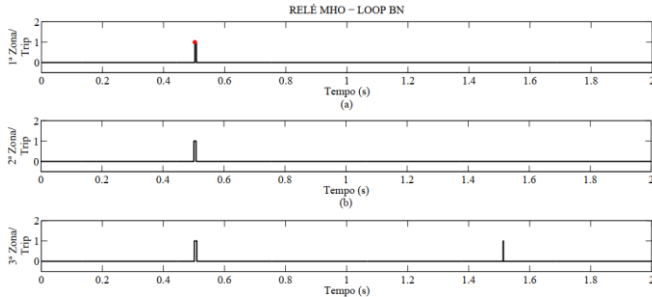


Fig 15. Impedância vista pelo relé no *loop* BN para GIC de 7,5 A e frequência de 0,1 Hz (a) Impedância vista pelo relé na primeira zona (b) Impedância vista pelo relé na segunda zona (c) Impedância vista pelo relé na terceira zona.

As Figuras 16 a 19 compreendem aos resultados obtidos com os seguintes parâmetros: GIC contínua de 5 A nas fases A, B e C iniciando no instante 0,5 segundo, com duração de 1 segundo e defasagem entre as fontes de -1° , significando que a linha está com carregamento leve.

A Figura 16 (a) mostra os sinais de tensão das três fases do sistema, referidos ao secundário do TP através da respectiva relação de transformação adotada (138 kV/115 V). Esses sinais são processados pelo filtro de Fourier de ciclo completo, o qual resulta os fasores utilizados no cálculo da impedância vista pelo relé para cada *loop* de falta. A Figura 16 (b) mostra os sinais de corrente total das três fases da rede, referidas ao secundário do TC, já com a GIC somada. Esses sinais também, são processados pelo filtro de Fourier de ciclo completo. Já a Figura 16 (c) mostra o sinal de GIC com duração de 1 segundo, a qual penetra no sistema através do aterramento do relé.

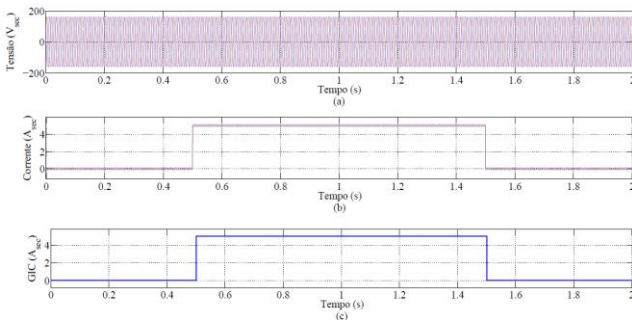


Fig 16. Sinais de tensão e corrente para GIC contínua de 5A (a) Sinais de tensão trifásica secundária (b) sinais de corrente trifásica fornecido no secundário do TC (c) sinal da GIC.

A Figura 17 mostra os valores RMS dos sinais de tensão das fases A, B e C, respectivamente. Obtidos através do filtro de Fourier de ciclo completo. Nessas figuras, pode-se notar que não houve interferência da GIC no sinal de tensão, tendo em vista que estes são fornecidos pelos TPs, os quais apresentam elevada impedância, dificultando a passagem das GICs através de seus circuitos. Por essa razão a GIC não interfere na medição de tensão. Ressalta-se, também, que foram considerados os TPs ideais, sendo desprezados os respectivos erros de transformação.

Os valores RMS dos sinais de corrente nas fases A, B e C, respectivamente, obtidos a partir do filtro de Fourier de ciclo completo, aparecem na Figura 18. Percebe-se que a componente contínua (GIC) foi bloqueada, pois o filtro está sintonizado para impedir a passagem de sinais com frequência menores de 60 Hz. Contudo, aparecem picos nos instantes em que a GIC é inserida e no momento em que seu efeito cessa. Isto ocorre pelo fato do filtro ainda não ter convergido para a resposta, após os respectivos transitórios de corrente.

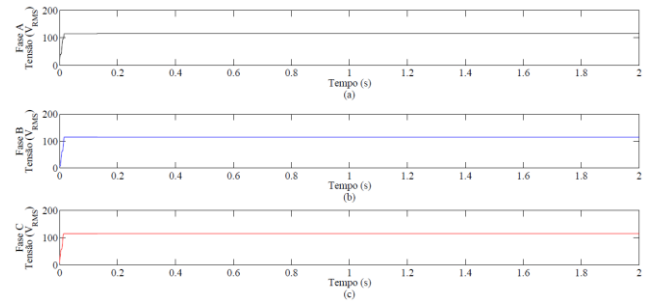


Fig 17. Resposta do estimador de fasores. (a) Tensão RMS da fase A. (b) Tensão RMS da fase B. (c) Tensão RMS da fase C.

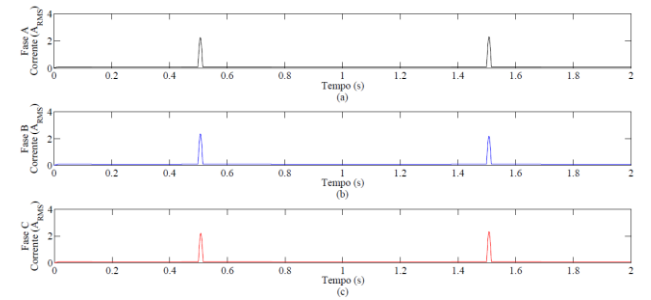


Fig 18. Resposta do estimador de fasores. (a) Corrente RMS da fase A. (b) Corrente RMS da fase B. (c) Corrente RMS da fase C.

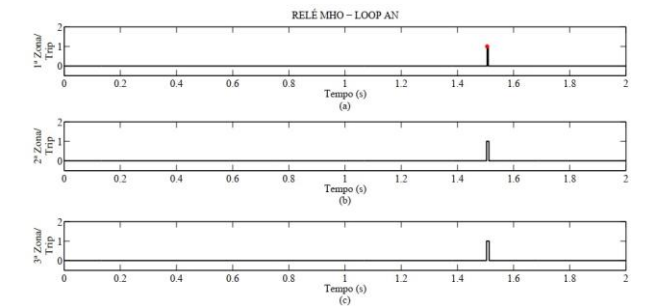


Fig 19. Impedância vista pelo relé no *loop* AN para GIC contínua de 5 A (a) Impedância vista pelo relé na primeira zona (b) Impedância vista pelo relé na segunda zona (c) Impedância vista pelo relé na terceira zona.

Através da Figura 19 é possível saber o exato momento em que as impedâncias entram na zona de proteção do *loop* AN. O mesmo se aplica para as zonas de proteção BN e CN. Nota-se, que isto ocorre no momento em que o estimador fasorial apresenta erro de resposta pela inserção e/ou eliminação da GIC no sistema, confirmando que o *trip* ocorre pelo erro causado na resposta do filtro de Fourier.

5 Conclusão

O presente trabalho apresenta um estudo sobre a atuação de transformadores de corrente e relés de distância submetidos à circulação de GICs na rede.

Tendo em vista os resultados obtidos para a análise do desempenho dos TCs frente a situações que envolvam GICs, pode-se concluir que o mesmo pode saturar, dependendo da magnitude desta corrente, devido ao incremento no fluxo magnético total gerado pela componente CC associada à respectiva GIC. Uma vez saturado, a componente contínua do sinal de corrente secundária total passa a circular no ramo de magnetização do TC, causando aquecimento do núcleo, bem como vibrações mecânicas, que, por sua vez, podem provocar o desgaste dos isolamentos, afetando a vida útil do TC. Além disso, a forma de onda distorcida entregue as cargas dos TCs, podem prejudicar a operação dos relés de proteção conectados em seus terminais secundários, ocasionando a atuação indevida desses dispositivos em situações que envolvam a circulação de GICs nas LTs.

Analisando o desempenho dos relés de distância, pôde-se concluir que, para GICs contínuas de magnitude maior ou igual a 5 A, sempre ocorre a atuação do relé de distância nos *loops* de falta à terra (AN, BN ou CN). O mesmo se verifica para os casos em que a GIC apresenta comportamento alternado, independentemente de sua frequência, desde que apresentem amplitudes maiores do que 7,5 A. Para ambos os casos, as atuações são verificadas para a 1ª zona de atuação dos relés, provocando o desligamento imediato da linha de transmissão. De modo geral, isso ocorre porque nos instantes em que ocorrem variações bruscas nos sinais de corrente, a resposta do filtro de estimação fasorial apresenta erro elevado, provocando assim a atuação dos relés nos instantes em que a GIC penetra no sistema e em que esta cessa seu efeito sobre a rede.

Sendo assim, conclui-se que o desenvolvimento de técnicas que detectem as GICs bem como a criação de modelos de previsão das magnitudes dessas correntes e a implementação de sistemas de monitoramento da atividade geomagnética beneficiariam a confiabilidade do SEP, por meio de uma melhor resposta operacional e de estratégias de proteção a serem aplicadas na ocorrência das GICs.

Referências Bibliográficas

Chapman S. e Bartels, J., (1940). Geomagnetism. Vol. 2.
Correia, C. (2007). O campo magnético da Terra. Dissertação.
Girgis, R., Vedante, K. (2012). Effects of gic on power transformers and power systems.

Heindl, M. et al. (2011). Investigation of gic related effects on power transformers using modern diagnostic methods. *XVII International Symposium on Highvoltage Engineering*.
Horowitz, S. H.; Phadke, A. G. (2008). *Power system relaying*.
Kappenman, J. (2012). A perfect storm of planetary proportions.
Lagoas, F. (2014). Filtro Morfológico para Detecção de Correntes Geomagneticamente Induzidas em Sistemas Elétricos de Potência.
Lorenzoni, A. P. (2017). Análise do desempenho dos dispositivos de proteção sob efeito de correntes geomagneticamente induzidas. (Trabalho de Conclusão de Curso).
Masahito, N. (1990). Graduate School of Science, Kyoto University.
Merrill, R.T., McElhinny, M.W., McFadden, P.L., (1998). The magnetic field of the Earth: Paleomagnetism, the core, and the deep mantle, Vol. 63 (*International Geophysics Series.*), Elsevier, Academic Press, Amsterdam.
Mustafa, T. I. A. H. et al. (2013). A study of correlation between protection trips and geomagnetically induced currents in a power transmission line in Brazil.
Pinto, L. M. et al. (2008). Um novo olhar sobre a segurança de sistemas elétricos. *IEEE Power and Energy Society General Meeting*.
Pirjola, R. (2000). Geomagnetically induced currents during magnetic storms. *IEEE Transactions on Plasma Science*, Vol. 28.
Ramírez-Ni, J. (2016). Core saturation effects of geomagnetic induced currents in power transformers. Vol. 14.
Santos, E. M. dos (2015). Compensação das formas de onda distorcidas pela saturação de transformadores de corrente com auxílio da estimação de frequência. Tese (Doutorado).
Santos, E. M. dos (2016). Proteção de Sistemas Elétricos de Potência.
Silva, M. G. M. (2012). Avaliação de Desempenho de Relés de Proteção Digitais. Dissertação.