

Detecção da Saturação de TCs através do Ângulo entre Amostras Consecutivas da Primeira Função-Diferença do Sinal de Corrente com Ajuste Adaptativo

Júlio C. C. dos Santos, Eduardo M. dos Santos, Jefferson O. dos Santos, Humberto Hasselein, Artur H. Rodrigues, Fernanda C. Ramos

*Grupo de Energia e Sistemas Elétricos de Potência – GESEP
Universidade Federal do Pampa – Campus Alegrete
Rio Grande do Sul, Brasil*

Abstract: Current Transformers (CTs) are essential equipment in electric power systems (EPS) protection schemes. The function of these equipments is to lower, in their secondary terminals, the current signals of the electric network. The protective relays actuations depend directly on the signals reproduced by these transformers. Therefore, the replicated current must have high fidelity in relation to the grid current, in order to allow the correct action of the protection devices. However, CTs are made of ferromagnetic materials and, because of this, are subject to a physical phenomenon called magnetic saturation, which causes distortions in the reproduced signal and may result in poor performance of the protective elements. In order to mitigate this problem, the study presented in this paper presents a new proposal for the detection of the secondary current signals distorted by CT saturation. The proposed method is based on the calculation of the angle formed between two consecutive samples of the absolute value of the differences between consecutive points of the current signal, using as criterion for detection an angle value corresponding to the highest value verified up to 1/8 of a cycle after the incidence of short circuit. Several tests were performed to prove the efficiency of the new method in the detection of intervals, and in all of them the proposed algorithm proved to be robust and effective.

Resumo: Os Transformadores de Corrente (TCs) são equipamentos essenciais em esquemas de proteção de Sistemas Elétricos de Potência (SEP). A função desses equipamentos é rebaixar, em seus terminais secundários, os sinais de corrente da rede elétrica. As atuações dos relés de proteção dependem diretamente dos sinais reproduzidos por esses transformadores. Portanto, a corrente replicada deve possuir grande fidelidade em relação à corrente da rede, para assim permitir a correta atuação dos dispositivos de proteção. No entanto, os TCs são constituídos de materiais ferromagnéticos e, por conta disto, estão sujeitos a um fenômeno físico denominado de saturação magnética, o qual provoca distorções no sinal reproduzido e pode resultar na má atuação dos elementos de proteção. De maneira a mitigar este problema, o estudo presente neste artigo apresenta uma nova proposta para a detecção dos trechos dos sinais de corrente secundária distorcidos pela saturação dos TCs. O método proposto é fundamentado no cálculo do ângulo formado entre duas amostras consecutivas do valor absoluto das diferenças entre pontos consecutivos do sinal de corrente, utilizando como critério para detecção um valor de ângulo correspondente ao maior valor verificado até 1/8 de ciclo após a incidência do curto-circuito. Foram realizados diversos testes para comprovar a eficiência do novo método na detecção dos intervalos, sendo que, em todos eles, o algoritmo proposto mostrou-se robusto e eficaz.

Keywords: Current Transformers; Protection; Electric Power Systems; Protective Relays; Magnetic Saturation; Distortions.

Palavras-chaves: Transformadores de Corrente; Proteção; Sistemas Elétricos de Potência; Relés de Proteção; Saturação Magnética; Distorções.

1. INTRODUÇÃO

Transformadores de Corrente (TCs) são elementos de extrema importância em esquemas de proteção de Sistemas Elétricos de Potência. Tais equipamentos têm como principais funções reproduzir, em menor escala, a corrente elétrica do sistema ao qual estão conectados, fornecer um nível de corrente que permita o bom funcionamento dos equipamentos de proteção conectados em seus terminais secundários e garantir o isolamento da rede elétrica a esses equipamentos.

A corrente secundária dos TCs determina a atuação de relés de proteção em esquemas que monitoram o sinal de corrente da rede para sua operação. Portanto, os TCs devem reproduzir o sinal da rede elétrica com proporcionalidade de módulo e fase, para que a atuação desses dispositivos de proteção ocorra de maneira correta. Sendo assim, esses transformadores são construídos com base em normas internacionais dentre as quais se destacam a *IEEE Standard Requirements for Instrument Transformers (2016)* e o *IEEE Guide for the Application of Current Transformers Used for Protective Relaying Purposes (2007)*.

Com o desenvolvimento da tecnologia digital, surgiram os relés microprocessados, os quais passaram a ser utilizados a partir da década de 70 (Goes, 2013). Esse tipo de relé possibilita a inserção de algoritmos numéricos, utilizados para a análise dos sinais de corrente da rede elétrica. Neste contexto, muitas técnicas para a detecção da saturação de TCs e correção da forma de onda distorcida foram propostas na literatura especializada.

Técnicas de detecção baseadas na Transformada Wavelet foram implementadas em Li et al. (2002) onde os autores utilizam a família Daubechies 2, além de um filtro Butterworth para a elaboração do algoritmo.

Além disso, metodologias fundamentadas nas funções-diferença do sinal amostrado foram propostas por Kang et al. (2001) e Kang et al. (2004), as quais serviram como base para a proposta de dos Santos et al. (2013).

Em dos Santos et al. (2010), foi proposto um método para detecção dos trechos distorcidos fundamentado no cálculo do ângulo formado entre amostras consecutivas do sinal de corrente, a qual serviu como base para a proposta apresentada neste artigo. Os referidos autores propuseram como critério para detecção da saturação o valor limítrofe de 10° , para o qual a corrente não se encontrava distorcida. Caso o ângulo calculado excedesse este valor, a saturação então era detectada.

Recentemente, Kumar et al. (2016) utilizaram a primeira diferença de magnitudes da curva de Lissajous, obtida através do sinal de corrente secundária e de sua primeira derivada. Já em Biswal et al. (2018), os autores propuseram a detecção da saturação de TCs utilizando um índice de monitoramento transitório (IMT).

Portanto, tendo em vista o problema exposto acerca da saturação de TCs, foi proposto um novo método, o qual utiliza o cálculo dos ângulos formados entre valores consecutivos do valor absoluto das diferenças para duas amostras consecutivas do sinal de corrente.

Nas próximas seções o problema da saturação, suas causas e efeitos são descritos, bem como é exposto o método proposto e os resultados utilizados para sua validação.

2. SATURAÇÃO DE TRANSFORMADORES DE CORRENTE

Na Fig.1, pode ser visualizado o circuito equivalente simplificado de um TC. Os parâmetros presentes neste circuito estão contidos na Tab.1.

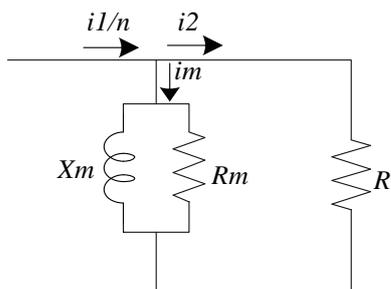


Fig. 1 Circuito equivalente simplificado de um TC – Fonte: Adaptado de dos Santos, (2012).

Tabela 1. Parâmetros do circuito equivalente do TC

Parâmetro	Descrição
X_m	Reatância de magnetização
R_m	Resistência de magnetização
R	Carga do TC
i_m	Corrente de magnetização
i_2	Corrente secundária do TC
i_1/n	Corrente secundária total

O equacionamento da corrente secundária do TC pode ser visto em (1), onde i_m corresponde a corrente que passa pelo circuito de magnetização do TC e i_1/n a corrente primária refletida ao lado secundário do transformador, sendo n a relação de transformação de corrente.

$$i_2 = \frac{i_1}{n} - i_m \quad (1)$$

A corrente de magnetização corresponde a uma parcela da corrente secundária que é subtraída de i_1/n (corrente secundária total). Esta parcela de corrente que é diminuída gera um erro no sinal da corrente que vai para a carga do transformador. Em condições normais de operação, o erro gerado é muito pequeno, pois a impedância de magnetização é muito maior que a impedância da carga, podendo ser desconsiderado.

Entretanto, quando ocorre a saturação do TC, a impedância de magnetização cai drasticamente. Sendo assim, grande parte da corrente primária refletida para o lado secundário do TC, passa a circular no ramo de magnetização, gerando com isso, um erro maior no sinal replicado pelo transformador. A Fig.2 ilustra a distorção causada na corrente secundária, quando o TC encontra-se saturado.

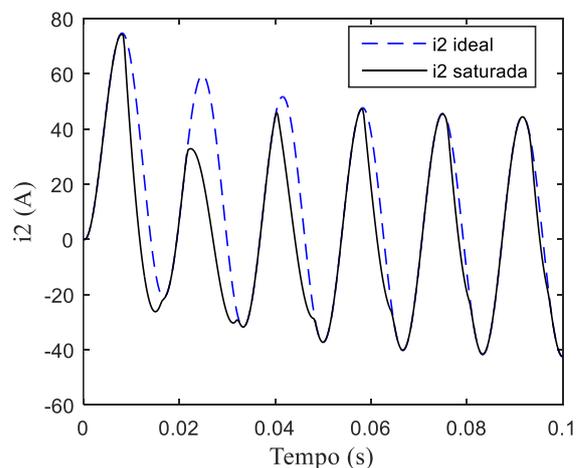


Fig. 2 Formas de onda da corrente secundária de um TC sem saturação e com saturação.

Em Kojovic (2002), o autor ressalta que como os relés digitais de proteção, atuam baseados no valor eficaz (RMS) da corrente de falta, quando ocorre a saturação do TC e o sinal enviado para o relé é distorcido, o cálculo do valor RMS resulta em uma resposta incorreta. O resultado disto é um atraso na atuação dos relés de sobrecorrente.

El-Amin & Al-Abbas (2006) demonstram que relés digitais de sobrecorrente instantâneos, podem operar corretamente mesmo quando existe a saturação do TC. No entanto, quando se trata de unidades temporizadas, o impacto da saturação é mais severo, dependendo da magnitude do curto-circuito.

Outros estudos demonstram que a saturação do transformador de corrente pode gerar erros na atuação de proteções com relés de distância e diferenciais, os quais podem ser vistos em Mooney (2008) e Rahmati (2011), justificando, neste contexto, a importância de pesquisas relacionadas a este fenômeno.

3. PROPOSTA PARA DETECÇÃO DOS INTERVALOS DISTORCIDOS

O algoritmo proposto é semelhante ao que foi desenvolvido por Santos et. al (2010), o qual leva em consideração, o ângulo formado pelo módulo da diferença entre amostras consecutivas do sinal de corrente.

Na Fig.3, pode ser observado um sinal de corrente secundária sem distorções causadas pela saturação do TC. Como pode ser visualizado, o sinal mantém-se em forma senoidal durante toda a amostragem.

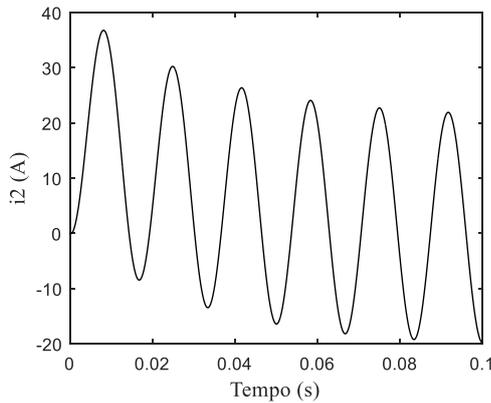


Fig. 3 Sinal de corrente secundária de um TC sem saturação.

Através do cálculo do módulo da primeira função diferença do sinal contido na Fig.3, realizado conforme (2), onde k corresponde à amostra atual do sinal, obtém-se a curva que pode ser observada na Fig.4.

$$\Delta_{i_2}(k) = |i_2(k) - i_2(k - 1)| \quad (2)$$

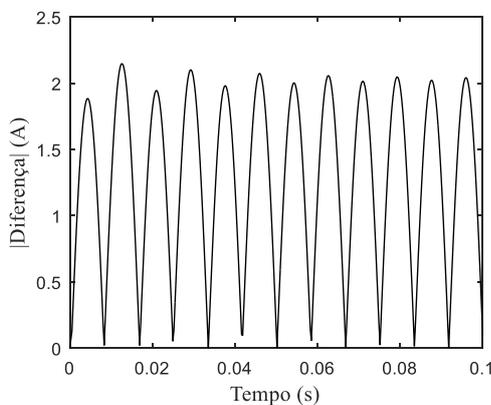


Fig. 4 Módulo da diferença entre pontos consecutivos do sinal de corrente.

Quando ocorre a saturação do TC, o sinal de corrente perde sua forma senoidal, devido às distorções causadas no sinal, conforme pode ser visualizado na Fig. 5.

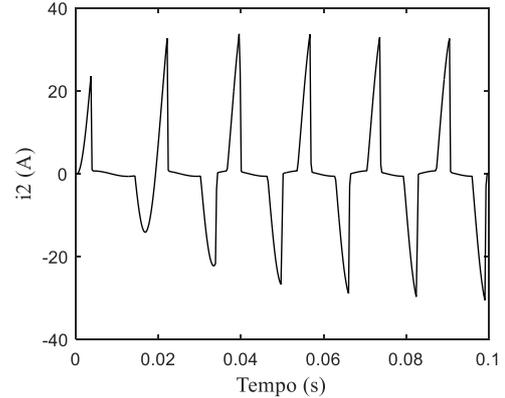


Fig. 5 Sinal de corrente secundária de um TC saturado

Como pode ser visualizado na Fig.5, a cada trecho do sinal distorcido pela saturação do transformador, ocorre uma grande variação no primeiro e no último ponto da região saturada.

Deste modo, percebe-se que no início do trecho distorcido pela saturação, ocorrem incrementos significativos, na curva do valor absoluto da diferença dos pontos subsequentes do sinal, conforme a Fig. 6. Ainda percebe-se, que o fim do trecho distorcido também pode ser identificado.

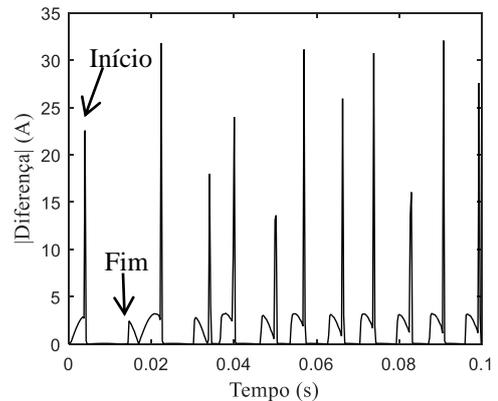


Fig. 6 Módulo da diferença entre pontos consecutivos do sinal de corrente.

Como os picos de início e fim do trecho distorcido, destacados na Fig. 6, demonstram uma grande variação da diferença entre os pontos, o ângulo formado entre esses picos também apresenta um valor elevado. Entretanto, onde o sinal não está distorcido, tais variações são menores e, por consequência disso, o ângulo formado entre elas também é menor.

O ângulo formado entre as amostras consecutivas do sinal de diferenças em módulo pode ser calculado de acordo com (3), valendo-se da relação do arco tangente para o triângulo retângulo. Além disso, a distância horizontal entre as amostras das diferenças foi normalizada como igual a um.

$$\alpha(k)^\circ = \tan^{-1} \left(\frac{\Delta_{i_2}(k) - \Delta_{i_2}(k - 1)}{1} \right) \cdot \frac{180}{\pi} \quad (3)$$

A curva obtida com o cálculo dos ângulos, para o sinal de corrente utilizado anteriormente, pode ser observada na Fig. 7. Esta é a curva que é utilizada para a detecção dos trechos distorcidos, uma que o início e o fim dos trechos distorcidos podem ser detectados com maior facilidade.

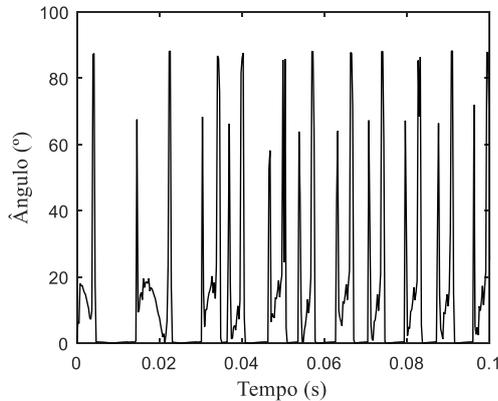


Fig. 7 Ângulo das diferenças

Além disso, foi verificado que o máximo ângulo calculado desde a incidência da falta até 1/8 ciclo após a ocorrência do curto-circuito, corresponde ao maior valor de ângulo para o qual não existe a saturação do TC. Portanto, a partir deste valor, determina-se o valor limítrofe (Th) para detecção dos trechos distorcidos, o qual é calculado conforme (4), onde N representa a taxa de amostragem por ciclo. Ainda, k igual 1 representa a primeira amostra após a ocorrência da falta

$$Th = \max \left[\begin{array}{l} \text{angulo} \left(k = 1, \dots, \frac{N}{8} \right) + 0,15 \cdot \\ \max \left[\text{angulo} \left(k = 1, \dots, \frac{N}{8} \right) \end{array} \right] \quad (4)$$

Em (4), o valor constante de 0,15 foi obtido empiricamente, correspondendo a um acréscimo de 15% do valor do máximo ângulo ao Th , de modo a evitar que ocorram erros na detecção.

Desta forma, quando a curva dos ângulos ultrapassa o valor de Th , satisfazendo o critério contido em (5), a saturação é detectada. Em seguida, o sinal do detector muda de zero para um, mantendo-se em um até que novamente ocorra a ultrapassagem do valor limite.

$$\hat{\text{Angulo}}(n)^\circ > Th \quad (5)$$

4. SIMULAÇÕES E RESULTADOS

O algoritmo de detecção proposto foi implementado no software MATLAB®. Os sinais de corrente secundária utilizados, foram obtidos através de simulações realizadas no software EMTP-ATP, utilizando o sistema teste que pode ser visualizado na Fig. 8.

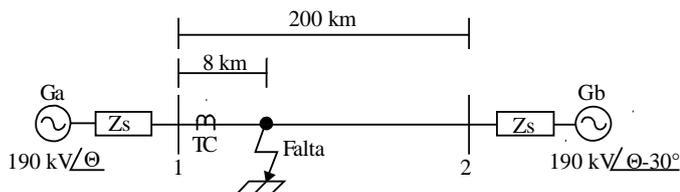


Fig. 8 Sistema Teste.

Na Fig. 8, G_a e G_b representam os geradores das barras 1 e 2 do sistema, suas impedâncias de sequência zero e sequência positiva são $3,681 + j24,515 \Omega$ e $0,819 + j 7,757 \Omega$, respectivamente. A tensão eficaz dos geradores é 190 kV e o ângulo de fase de G_b , está atrasado em 30° em relação ao ângulo de fase de G_a . A frequência do sistema é de 60 Hz e a linha de transmissão (LT) tem 200 km de comprimento, com impedância de sequência zero igual a $0,1841 + j1,2258 \Omega/\text{km}$ e impedância de sequência positiva igual a $0,041 + j0,3878 \Omega/\text{km}$. A saturação do TC foi obtida através da simulação de um curto-circuito causado a 8 km da barra 1.

O transformador de corrente utilizado nas simulações foi um do tipo C400, com relação de transformação de 2000:5. A indutância e a resistência consideradas no transformador foram de 0,3016 mH e 0,5 Ω , respectivamente.

Foram feitas simulações com cargas puramente resistivas de 4 e 100 ohms, com frequência de amostragem de 3840 Hz, o que corresponde a $N = 64$ amostras/ciclo.

Além disso, foi considerado o fluxo magnético remanescente no núcleo do transformador. Este fluxo foi obtido com a utilização de um indutor não-linear Tipo-96 e o ponto de joelho da curva de histerese foi ajustado em 2,05 A e 1,51 V, através da função HYSDAT contida no software EMTP-ATP.

Para melhor comprovar a eficiência do algoritmo na detecção dos trechos, foi plotada uma curva obtida com a diferença entre o sinal ideal da corrente replicada (sem saturação) e o sinal da corrente saturada, obtendo-se assim, um sinal gerado pelas distorções existentes na corrente replicada. Buscando melhorar a visualização no gráfico e a comparação com o sinal do detector, a curva foi plotada da seguinte maneira: quando a diferença entre os sinais saturado e não saturado for maior que zero, a curva passa de 0 para 1,2, mantendo-se em 1,2 enquanto a diferença possuir um valor não nulo.

Além disso, durante os testes realizados, foi possível observar que, após algumas amostras, o início do trecho distorcido foi detectado de maneira correta, porém, o fim do mesmo trecho estava sendo detectado antecipadamente. No entanto, isso ocorria em amostras do sinal nas quais as distorções causadas pela saturação eram mínimas, portanto, poderiam ser desconsideradas. Sendo assim, o algoritmo foi programado para após detectar o início do trecho distorcido, procurar o final do trecho por um tempo mínimo de 1/5 de ciclo, mantendo o detector em 1 enquanto este tempo não fosse atingido, evitando a detecção antecipada do fim do intervalo.

4.1 Teste 1: Falta Monofásica com 0% de Fluxo Remanescente e Carga de 4 Ω

Para o primeiro teste, foi realizada a simulação de uma falta monofásica com 0% de fluxo magnético remanescente. O resultado obtido para este teste pode ser visualizado na Fig. 9.

Como pode ser visto, os trechos distorcidos pela saturação do TC foram detectados corretamente de acordo com o intervalo ideal, sendo que, neste caso, ocorreram 5 trechos distorcidos.

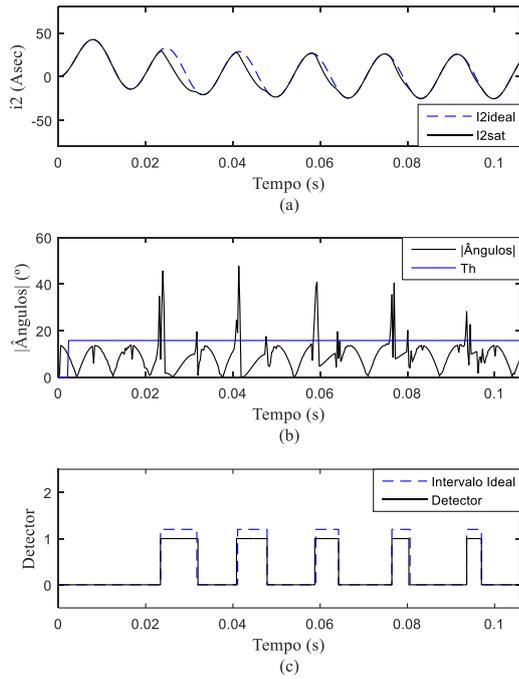


Fig. 9 Resultados do primeiro teste. (a) Corrente secundária distorcida e ideal. (b) Ângulos entre as diferenças. (c) Sinal do Detector de Saturação.

4.2 Teste 2: Falta Monofásica com 0% de Fluxo Remanescente e Carga de 100 Ω

Para este teste foi simulada uma falta monofásica e a carga do TC foi aumentada para 100 Ω . O resultado obtido para esta simulação é apresentado na Fig. 10.

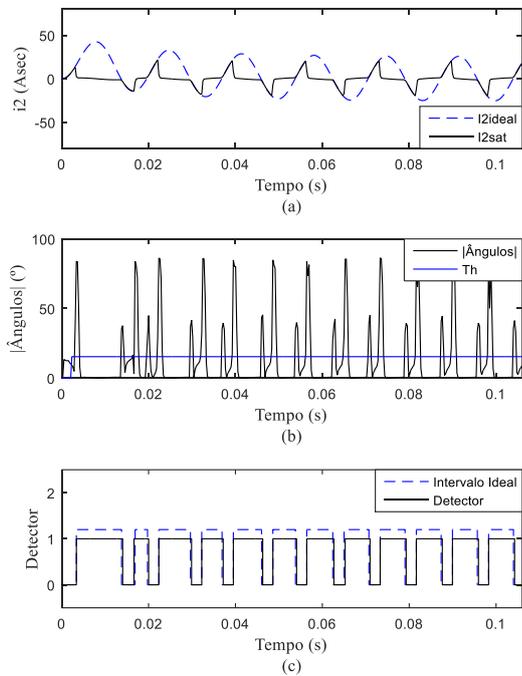


Fig. 10 Resultados do terceiro teste. (a) Corrente secundária distorcida e ideal. (b) Ângulos entre as diferenças. (c) Sinal do Detector de Saturação.

Percebe-se que o aumento da carga, faz com que as distorções causadas no sinal sejam ainda mais severas. Caso

tais distorções não sejam processadas de maneira correta pelo relé, o esquema de proteção deste sistema pode atuar com atraso ou, em alguns casos, nem mesmo atuar.

Vale ressaltar que nos testes realizados, em alguns momentos, o intervalo de distorção detectado difere em uma amostra no início e/ou no fim do sinal ideal contido no gráfico. No entanto, a ocorrência disto em nada afetaria na atuação de um método de correção do sinal, o qual depende de uma correta detecção dos trechos distorcidos para atuar de maneira efetiva.

4.3 Teste 3: Falta Monofásica com 20% de Fluxo Remanescente, Carga de 100 Ω e adição de um Ruído Gaussiano Branco de 40 dB

Neste teste através da função AWGN (Add White Gaussian Noise) contida no software MATLAB, foi realizada a adição de um Ruído Gaussiano Branco 40 dB ao sinal analisado. Os resultados obtidos estão contidos na Fig. 11.

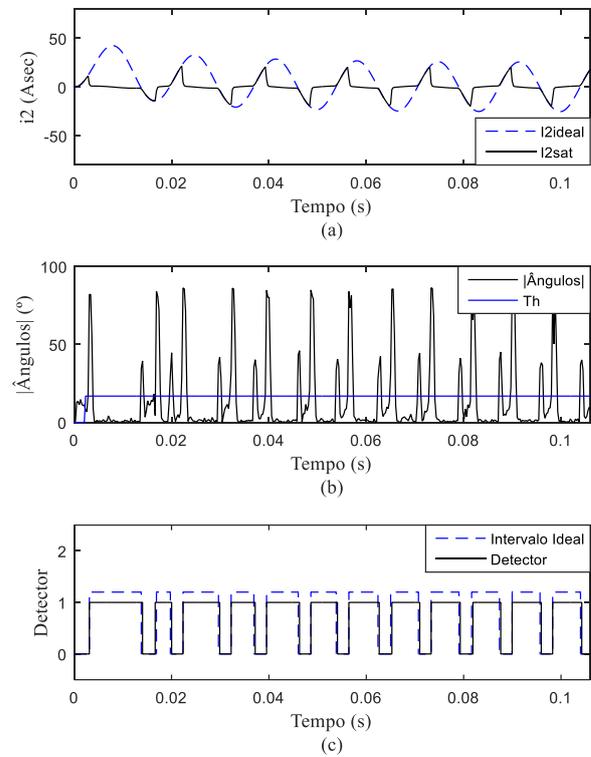


Fig. 11 Resultados do quinto teste. (a) Corrente secundária distorcida e ideal. (b) Ângulos entre as diferenças. (c) Sinal do Detector de Saturação.

A adição do ruído ao sinal foi feita para melhor comprovar a robustez do método frente a diferentes tipos de condições que possam existir em um SEP.

4.4 Comparação do método proposto com o algoritmo de Kang et al. 2004.

As Tab. 2, 3 e 4, demonstram uma comparação referente aos testes realizados entre o algoritmo proposto nesta pesquisa e o proposto por Kang et al. (2004). Nas tabelas são identificados o instante inicial do primeiro trecho detectado (definido como IPT) e também o número de intervalos detectados por cada metodologia.

O método implementado nesta pesquisa foi comparado com o algoritmo proposto por Kang et al. (2004), pois este é um algoritmo que serve como referência principal para diversos outros métodos de detecção existentes na literatura.

Tabela 2 - Comparação referente ao Teste 1

Algoritmo	IPT (s)	Trechos Detectados
Kant et. Al (2004)	0,02314	4
Proposto	0,0234	5

Tabela 3 - Comparação referente ao Teste 2

Algoritmo	IPT (s)	Trechos Detectados
Kant et. Al (2004)	0,00312	12
Proposto	0,00338	12

Tabela 4 - Comparação referente ao Teste 3

Algoritmo	IPI (s)	Trechos Detectados
Kant et. Al (2004)	0,00286	12
Proposto	0,00312	12

Percebe-se que em todos os testes, o algoritmo proposto detectou o início do primeiro trecho uma amostra depois que a metodologia comparada. No entanto, vale ressaltar que uma amostra de diferença não acarretaria na correção incorreta do sinal distorcido.

Além disso, observa-se na Tab.2, que o algoritmo proposto detectou um trecho a mais que o detector de Kang et al. (2004). Isso ocorreu por conta do ajuste feito no método, pois quando é detectado apenas o início de um novo intervalo e não o fim, o método “busca” pelo fim deste trecho pelo tempo mínimo de 1/5 de ciclo, zerando o detector após isso.

5. CONCLUSÕES

No presente artigo, foi proposto um novo método para a detecção dos intervalos distorcidos pela saturação de transformadores de corrente. Para a validação do método, foram realizadas simulações de faltas monofásicas com variação da carga do TC e, também, do fluxo magnético remanescente no núcleo do mesmo, além da verificação de sua eficácia com a existência de um ruído de 40 dB no sinal. Em todos os testes realizados, o algoritmo mostrou-se eficaz, propiciando uma detecção correta dos intervalos distorcidos.

Por fim, destaca-se que a técnica proposta é de fácil implementação e grande robustez, podendo ser aplicada em relés numéricos, contribuindo para um aumento da confiabilidade dos esquemas de proteção em SEP.

REFERÊNCIAS

BISWAL, Sandeep; BISWAL, Monalisa. Algorithm for CT Saturation Detection with the Presence of Noise. In: 2018 4th International Conference on Electrical Energy Systems (ICEES). IEEE, 2018. p. 248-251.

DOS SANTOS, E. M. et al. 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, v. 28, n. 1, p. 29-37, 2012.

DOS SANTOS, E. M. et al. Detecção do Intervalo de Saturação de Transformadores de Corrente Através do Ângulo entre as Diferenças das Amostras de Corrente Secundária. XVIII Congresso Brasileiro de Automática, Bonito-MS, Brasil, Setembro 2010a.

EL-AMIN, Ibrahim M.; AL-ABBAS, Nabil H. Saturation of current transformers and its impact on digital overcurrent relays. In: 2006 IEEE/PES Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin America. IEEE, 2006. p. 1-6.

GOES, Alan Ribeiro Gomes. Modernização da proteção de sistemas elétricos de potência. Trabalho de Conclusão de Graduação, Universidade Federal de Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

IEEE Guide for the Application of Current Transformers Used for Protective Relaying Purposes (2007). IEEE Standard C37.110-2007.

IEEE Standard Requirements for Instrument Transformers (2016). IEEE Standard C57.13-2016.

KANG, Y. C.; OK, S. H.; KANG, S. H. A novel CT saturation detecting algorithm unaffected by a remanent flux. In: 2001 Power Engineering Society Summer Meeting. Conference Proceedings (Cat. No. 01CH37262). IEEE, 2001. p. 1324-1327.

KANG, Yong-Cheol; OK, Seung-Hun; KANG, Sang-Hee. A CT saturation detection algorithm. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 19, n. 1, p. 78-85, 2004.

KOJOVIC, Lj A. Impact of current transformer saturation on overcurrent protection operation. In: IEEE Power Engineering Society Summer Meeting,. IEEE, 2002. p. 1078-1083.

KUMAR, Kanhaiya; KUMBHAR, Ganesh B.; MAHAJAN, Satish. A new efficient algorithm to detect Current Transformer saturation. In: 2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM). IEEE, 2016. p. 1-5.

KUMAR, Kanhaiya; KUMBHAR, Ganesh B.; MAHAJAN, Satish. A new efficient algorithm to detect Current Transformer saturation. In: 2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM). IEEE, 2016. p. 1-5.

LI, F.; LI, Y.; AGGARWAL, R. K. Combined wavelet transform and regression technique for secondary current compensation of current transformers. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, v. 149, n. 4, p. 497-503, 2002.

MOONEY, Joe. Distance element performance under conditions of ct saturation. In: 2008 61st Annual Conference for Protective Relay Engineers. IEEE, 2008. p. 491-497.

RAHMATI, A. A directional current differential protection against CT saturation in two sides fed networks. In: 2011 IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition. IEEE, 2011. p. 1-5.