

Correção da Saturação de TCs Usando a Plataforma LabVIEW

Ericson Norberto A. Santos*, Benemar A. de Souza[†], Francisco das C. F. Guerra[‡], Fagner A. Pereira[§]
Rua Aprígio Veloso, 882 – Bairro Universitário – CEP: 58.429-900 – Campina Grande – PB

Resumo—É apresentada uma interface de correção dos efeitos da saturação e estudo do comportamento dinâmico dos transformadores de corrente (TCs), em tempo real, programada na plataforma LabVIEW. Os algoritmos implementados simulam a corrente de falta em um sistema de energia elétrica, bem como a resposta transitória do TC. É proposto um método para a correção da distorção na corrente secundária do TC baseado em uma técnica de ajuste de curvas por Levenberg-Marquardt. Os erros de relação e de fase, bem como as distorções na corrente secundária devido à saturação do núcleo em situações de falta são corrigidos satisfatoriamente. Vários casos foram testados e os resultados mostraram que o método proposto é muito eficaz para melhorar o desempenho dos esquemas de proteção com base na medição da corrente.

Palavras-chave—TC, saturação, Levenberg-Marquardt, relés, ajuste de curvas, LabVIEW.

I. INTRODUÇÃO

Transformadores de corrente (TCs) são essenciais para o funcionamento eficaz da proteção de sistemas elétricos. Seu trabalho é reproduzir, dentro da escala adequada no enrolamento secundário, as altas correntes do enrolamento primário, proporcionando, ao mesmo tempo, acesso indireto a esses sinais. TCs, como todos os equipamentos que têm um núcleo ferromagnético, estão sujeitos ao fenômeno de saturação. Isso pode fazer com que os relés de proteção conectados a eles não funcionem adequadamente, resultando em danos térmicos e eletrodinâmicos, perda de seletividade da proteção, perda de estabilidade do sistema, dificuldade em localizar a falha, causando, portanto, interrupções prolongadas no fornecimento de eletricidade [1].

Uma análise do estado da arte revelou que essas falhas foram investigadas por cerca de quarenta anos. Desde então, métodos foram concebidos para mitigar tais problemas. Com o advento dos DSPs (Digital Signal Processors), tornou-se possível incorporar estes métodos e, portanto, detectar e corrigir problemas de saturação em tempo real. Isto proporciona uma melhoria do desempenho do relé de proteção, conferindo continuidade e confiabilidade ao sistema. Atualmente muito se tem feito no que se refere à técnicas de detecção e correção das distorções. Embora muitas destas metodologias apresentem desempenho considerado bom, dentro de determinadas circunstâncias, nenhuma delas é totalmente eficaz para todas as situações possíveis [2].

A eficiência das técnicas para compensar a distorção da corrente secundária está diretamente relacionada aos métodos de detecção. É necessário saber o instante em que a saturação começa e quando termina, permitindo que esses problemas sejam corretamente corrigidos. Uma má detecção dos instantes de saturação inicial e final pode introduzir erros desnecessários, agravando ainda mais os efeitos da distorção na forma de onda da corrente secundária. A utilização de uma técnica de detecção de saturação possibilita a utilização de amostras de regiões não saturadas ao longo do processo de estimação, permitindo, no final, a reconstrução das partes distorcidas [3].

A interface de correção da saturação, apresentada neste trabalho, baseia-se na implementação do método de Levenberg-Marquardt (LM) na plataforma LabVIEW. Um algoritmo de detecção de falta, baseado na função diferença de terceira ordem, é utilizado para discernir entre a condição normal e de falta e, também, a identificação dos instantes inicial e final da saturação. Uma vez detectada a condição de falta, as amostras seguintes são armazenadas em um buffer e enviadas para o método de LM que, então, fornece as constantes da função que descreve a corrente secundária de falta. Novas amostras de corrente são calculadas e utilizadas em substituição as amostras dos trechos distorcidos reduzindo significativamente os erros ocasionados pela saturação.

Na seção 2 é descrita a metodologia. A plataforma de hardware utilizada para a simulação do sistema elétrico e validação do método proposto é apresentado na seção 3. O conjunto de hardware e software da plataforma de correção é apresentado na seção 4. Finalmente, na seção 5 são realizadas análises dos resultados da implementação em tempo real do método proposto e sua aplicabilidade.

II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A. Desempenho do TC em Regime Saturado

Os TCs são projetados para suportar valores de corrente superiores às correntes de regime permanente, decorrente das condições anormais de operação do sistema elétrico. Contudo, quando estas correntes superam os limites suportáveis por estes equipamentos, o TC poderá saturar ocasionando distorções na forma de onda secundária. Os TCs empregados em proteção são projetados para suportar valores de densidade de fluxo associadas a corrente de até 20 vezes o seu valor nominal, sem que haja distorções acima dos valores especificados por sua classe de exatidão [4].

TCs reais têm perdas de cobre, perdas do núcleo, fluxo de dispersão, e exigem uma determinada corrente para magnetizar

*Ericson Santos (ericson.santos@ee.ufcg.edu.br) é doutorando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFCG/COPELE. [†]Benemar Souza (benemar@dee.ufcg.edu.br) e [‡]Francisco Guerra (chagas@dee.ufcg.edu.br) são professores do Departamento de Engenharia Elétrica da UFCG. [§]Fagner Pereira (fagner@ee.ufcg.edu.br) é professor do Instituto Federal da Paraíba, IFPB.

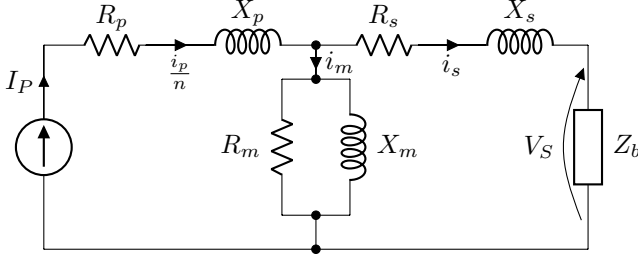


Fig. 1: Circuito equivalente do TC referido ao secundário.

o núcleo. Como resultado, a corrente secundária de um TC não é perfeitamente proporcional à corrente primária. Para a maioria das condições de funcionamento, os TCs reproduzem bem as correntes primárias. No entanto, sob certas condições, o núcleo do TC satura e não é mais possível reproduzir corretamente a corrente primária [5]. A Fig. 1 mostra o circuito equivalente de um TC referido ao lado secundário. A corrente I_P é imposta pelo circuito primário. A fonte de corrente representa o sistema de potência, a impedância de dispersão do circuito primário referida ao secundário é representada por $Z_P = R_p + X_p$. Como o enrolamento primário é composto por uma única espira que é o próprio condutor de fase, a impedância de dispersão do primário não tem efeito prático sobre o comportamento do TC e pode ser desprezada [5].

A corrente de excitação i_M que flui pelo ramo de magnetização do TC tem duas componentes: uma componente magnetizante que flui através do ramo indutivo e que é necessária para gerar o fluxo do núcleo e outra componente de perdas, que flui pelo ramo resistivo e é responsável pelas perdas por histerese e por correntes de Foucault. A impedância Z_b representa a carga conectada ao secundário do TC, a qual possui uma componente resistiva e uma indutiva. Quando a tensão secundária V_S é baixa, a corrente de excitação i_M é baixa e o TC comporta-se quase que linearmente, sem saturação no núcleo magnético. Quando V_S aumenta por um aumento da corrente ou da impedância da carga, a corrente de excitação aumenta provocando um incremento no fluxo do núcleo. A uma dada magnitude de fluxo o núcleo satura e, a partir daí, a corrente de excitação aumenta desproporcionalmente provocando distorções na corrente secundária do TC [6].

Durante os instantes em que o núcleo satura, praticamente toda a corrente i_p/n passa pelo ramo de magnetização ocasionando distorções na forma de onda da corrente secundária i_s [6]. A fig. 2 ilustra a corrente secundária para os casos em que não há saturação no núcleo e a mesma corrente para um TC saturado. Em geral o alcance dos relés de distância é afetado pela saturação do TC. Isto se verifica, pois os relés utilizam a medição do valor RMS da corrente. Durante a saturação uma parte da corrente secundária está ausente de modo que a impedância medida é muito grande. Segundo [6], isto implica em uma redução na zona de alcance do relé ocasionando atuação indevida da proteção.

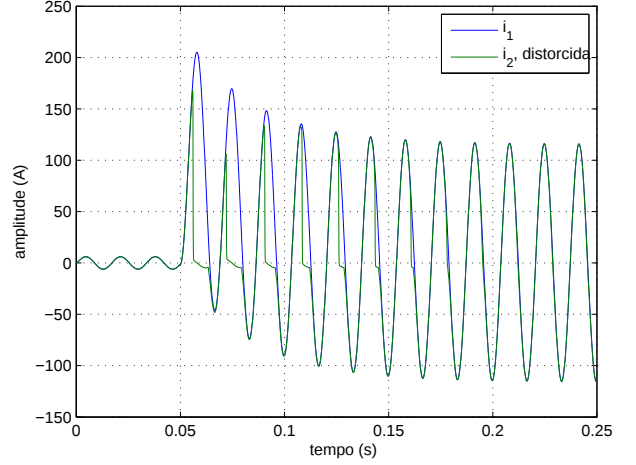


Fig. 2: Corrente secundária de falta.

B. Sistema Primário e Corrente de Falta

Considerando a linha de transmissão monofásica da Fig. 1, onde a fonte fornece uma tensão $u(t) = A \sin(\omega t + \phi)$, e supondo uma falta no ponto indicado, sendo a impedância primária total representada pela soma da impedância da fonte e do comprimento da linha de transmissão entre o TC e o ponto de falta, o valor instantâneo da corrente de falta, considerando a máxima condição de assimetria é dado por [7]:

$$i_{1F} = A \cos(\omega t + \phi) + B \exp^{\lambda t} = i_{\sin}(t) + i_{exp}(t) \quad (1)$$

A corrente de falta é expressa como uma combinação de duas componentes: uma senoidal e uma exponencial. A primeira representa a componente periódica de regime permanente, determinada pela fonte de tensão e pela impedância de falta. A segunda representa a parcela exponencial de decaimento, de constante de tempo X/R . Desta forma, (1) deve ser satisfeita para qualquer instante de uma região não saturada da forma de onda. Os parâmetros A , B , ϕ e λ são os parâmetros desconhecidos que caracterizam a forma de onda da corrente secundária podendo ser usada para obter novas amostras para os trechos saturados.

Decompondo o termo exponencial de (1) em uma série de Taylor, truncando no segundo termo e multiplicando por uma constante B , obtém-se (2). A referência [10], afirma que o polinômio de Taylor de segunda ordem oferece uma precisão satisfatória e qualquer termo de ordem superior não apresentará importância significativa [7].

$$B \exp \lambda t = B(1 + \lambda t) = b_1 + b_2 t \quad (2)$$

sendo $b_1 = B$ and $b_2 = B\lambda$. Agora, decompondo o termo senoidal de (1), obtém-se:

$$A \cos(\omega t + \phi) = A \cos(\phi) \cos(\omega t) - A \sin(\phi) \sin(\omega t) \quad (3)$$

que, após uma simplificação, tem-se:

$$A \cos(\omega t + \phi) = a_1 \cos(\omega t) + a_2 \sin(\omega t) \quad (4)$$

sendo: $a_1 = A \cos(\phi)$ and $b_2 = -A \sin(\phi)$. Combinando (2) e (4), obtém-se:

$$i_{1F} = a_1 \cos(\omega t) + a_2 \sin(\omega t) + b_1 + b_2 t \quad (5)$$

onde: a_1 , a_2 , b_1 and b_2 os coeficientes desconhecidos a serem determinados pelo método de regressão de LM. Uma vez obtidos, estes coeficientes podem ser usados para determinar os parâmetros de (2), e assim calcular novas amostras de corrente para os trechos distorcidos [7].

III. MÉTODO PROPOSTO

O módulo de condicionamento de sinal possui duas entradas e duas saídas, conectadas às portas correspondentes do sistema de correção. O fluxograma do método de correção proposto é ilustrado na Fig. 3 e descrito pelas etapas abaixo.

- 1) Inicialmente o sistema calcula a função diferença de terceira ordem. O valor calculado é comparado com um valor fixo (threshold), obtido empiricamente, e caso seja maior que o threshold, então uma condição de falta é detectada.
- 2) Detectada a condição de falta as n amostras seguintes são armazenadas em um buffer. As amostras armazenadas devem ser suficientes para que o método de LM possa convergir de forma satisfatória. A depender das condições da falta (sobretudo a presença ou não da remanência) o valor de n deve ser ajustado de modo a conter apenas amostras da região não saturada da corrente de falta.
- 3) As amostras armazenadas no buffer são então usadas pelo método de Levenberg-Marquardt para estimar as constantes da função definida em (5) e usadas para calcular os parâmetros de (1).
- 4) Novas amostras são obtidas, usando-se (1), e então utilizadas em substituição às amostras de corrente originais.

Uma etapa muito importante durante o processo de correção é a determinação da condição de falta. As amostras utilizadas no processo de estimação devem pertencer exclusivamente ao trecho não distorcido da corrente de falta. Esta detecção é feita por meio da avaliação da função diferença de terceira ordem, para duas amostras de corrente consecutivas, dada por [8]:

$$del[k] = i_S[k] - 3i_S[k-1] + 3i_S[k-2] - i_S[k-3] \quad (6)$$

Observa-se que, quando não há uma mudança súbita no comportamento do sinal de corrente, isto é, quando não há a condição falta, os valores das funções diferença de terceira ordem são muito próximos de zero. Quando ocorre uma falta, nos instantes em que se verifica uma mudança súbita no comportamento do sinal de corrente, a função diferença apresenta pulsos significativos que podem ser usados para discernir entre uma condição de falta ou não e, também, determinar os instantes de início e término da saturação [8].

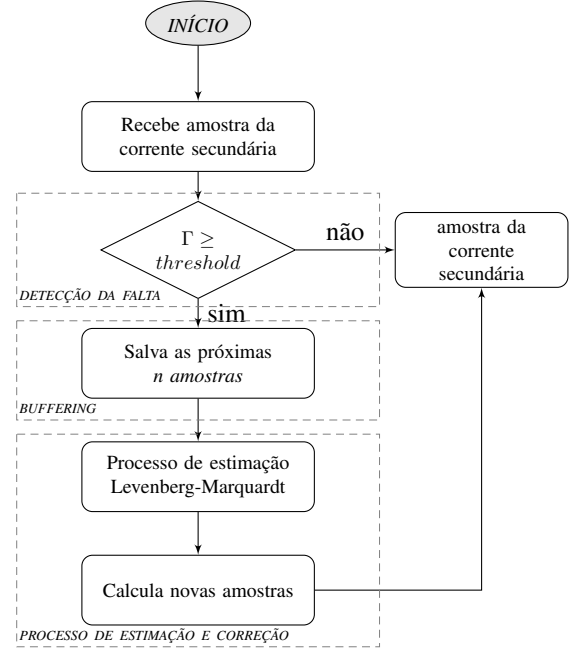


Fig. 3: Fluxograma do método proposto.

Após a detecção da condição de falta, as amostras seguintes são armazenadas em um buffer e, na sequência, são enviadas ao algoritmo de LM.

$$\Gamma = \frac{del3[k]}{del3[k-1]} \quad (7)$$

$$\Gamma \geq threshold \quad (8)$$

Embora seja possível determinar os instantes de início da corrente falta, por avaliação de (8), e do primeiro trecho saturado, por avaliação de (6), não é recomendável armazenar em buffer todas as amostras da corrente de falta, pois em um sistema de correção em tempo real, o tempo equivalente ao intervalo entre 10 amostras consecutivas (aproximadamente), faz-se necessário para efetuar o cálculo dos coeficientes de (5) antes do início do primeiro trecho distorcido. Desta forma, deve-se ajustar o tamanho do buffer de modo que sempre haja um tempo mínimo disponível para executar o método de LM.

IV. PLATAFORMA DE SIMULAÇÃO

O sistema de correção desenvolvido baseia-se na instrumentação virtual em LabVIEW. O programa é capaz de controlar um hardware de aquisição de sinais, obter amostras do sinal e avaliar a condição de falta para o sinal amostrado. É possível, também, salvar e exportar os dados para tratamento em outros aplicativos a exemplo do MATLAB.

O programa permite o ajuste manual do gatilho, o que possibilita a aquisição de uma janela de amostras do sinal de falta (single shot), limitando o tamanho do arquivo de saída. A Fig. 5 apresenta o subVI do método de detecção de falta e a Fig. 6 apresenta a tela principal do VI do sistema de correção da saturação.

Os sinais de corrente utilizados na avaliação do sistema de correção foram obtidos por meio da simulação de faltas em

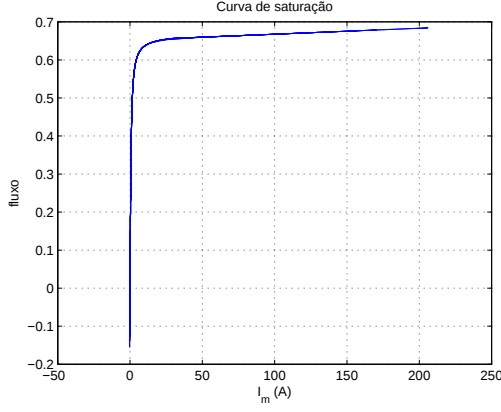


Fig. 4: Curva de magnetização do TC.

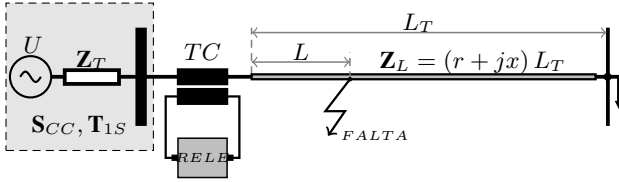


Fig. 5: Sistema primário considerado no estudo.

um controlador digital de sinais (DSC). O diagrama de linha do sistema primário é mostrado na Fig. 4 e corresponde a uma linha de transmissão típica de 230 kV do sistema de CHESF (Companhia Hidroelétrica do São Francisco). Os parâmetros do sistema primário são apresentados na Tab. 1 e os do TC na Tab. 2. A curva de saturação do TC foi obtida por simulação, usando o modelo de Jiles-Atherton de [9] e é apresentada na fig. 4.

As simulações em tempo real foram realizadas em uma plataforma de hardware com processador de 32 bits, TMS320F28335, fabricada pela Texas Instruments. A plataforma ainda conta com dois conversores analógico digital, DAC7621 de 12 bits, para conversão dos sinais de corrente (primária, utilizada para comparação e cálculo do erro de correção e secundária) entre as plataformas. Os valores calculados pelo algoritmo de simulação são dimensionados e enviados a um barramento multiplexado, de 12 bits, do DSC.

A cada 50us o DSC realiza as operações descritas abaixo:

- Calcula a corrente primária e a corrente secundária;
- Escala a magnitude para 12 bits;
- Escreve os valores resultantes do barramento de dados, um por vez. Para cada valor escrito, o barramento de controle seleciona o conversor D/A adequado e atualiza

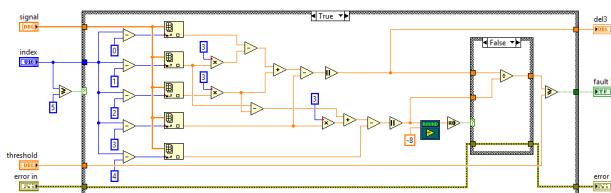


Fig. 6: SubVI do método de detecção.

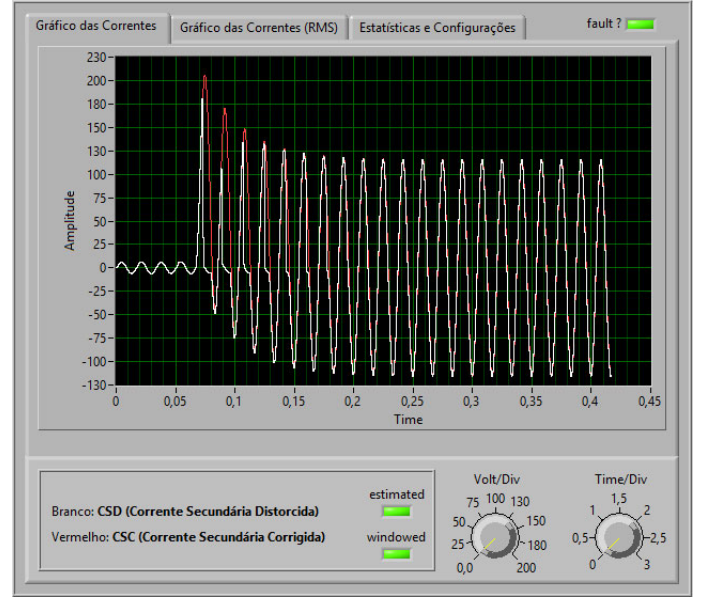


Fig. 7: Painel frontal do módulo LabVIEW.

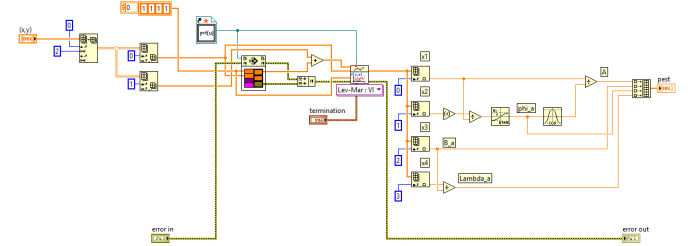


Fig. 8: SubVI do método de correção.

a saída para o sistema de correção.

A simulação é iniciada em estado estacionário. Quando o botão “Disparo de Falta” é pressionado, o regime de falta começa. Quando o botão é liberado, a simulação volta para a condição inicial. O sistema foi programado a partir do kit de desenvolvimento eZdsp F28335 fornecido pela Spectrum Digital Incorporated, ligado a conversores D/A, montados separadamente em placas de circuito impresso. A linguagem de programação utilizada foi o C++ e o ambiente o Code Composer Studio 3.3.

V. RESULTADOS

São apresentados os resultados da avaliação do algoritmo para três casos distintos de valores de impedância total: $1.25 + j0.0\Omega$, $0.50 + j0.25\Omega$ e $2.15 + j0.7\Omega$. Resultados para outros casos adicionais são apresentados, na Tab. 3, onde as mesmas configurações de impedância total são consideradas, porém, variando-se o ângulo de incidência de falta e a remanência.

O valor RMS da corrente de falta é calculado por (9). Uma vez que os valores RMS das formas de onda de corrente primária e secundária, distorcida e corrigida são calculadas, o erro percentual máximo [10] pode ser calculado por (10).

$$I_{(1,2),RMS} = \sqrt{\left(\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N i(n)^2\right)} \quad (9)$$

Tab. 1: Configuração do sistema primário

Tensão nominal	230 kV
Corrente nominal	800 A
Comprimento da linha de transmissão, L_T	85 km
Resistência série, r	0.0319 Ω/km
Reatância série, x	0.3311 Ω/km
Capacitância shunt, c	12.333 Ω/km
Constante d tempo da barra de 230 kV	35 ms
Impedância de Thevenin na barra de 230 kV	$Z_T = 0.56 + j7.35$
Distância do TC à falta	5 km

Tab. 2: Especificações do TC

Relação de transformação	1/180
Corrente nominal	900/5
Área da seção reta	$1.91 \cdot 10^{-3}$
Comprimento médio do caminho magnético	0.50 m
Resistência do enrolamento	0.25 Ω
Reatância do enrolamento	desprezível
Reatância de dispersão	desprezível
burden nominal	1.00 Ω

$$\varepsilon\% = \max \left\{ \left| \frac{I_{1,RMS} - RTC \cdot I_{2,RMS}}{I_{1,RMS}} \right| \right\} \times 100\% \quad (10)$$

onde N é a taxa de amostragem usada na simulação (20 kHz).

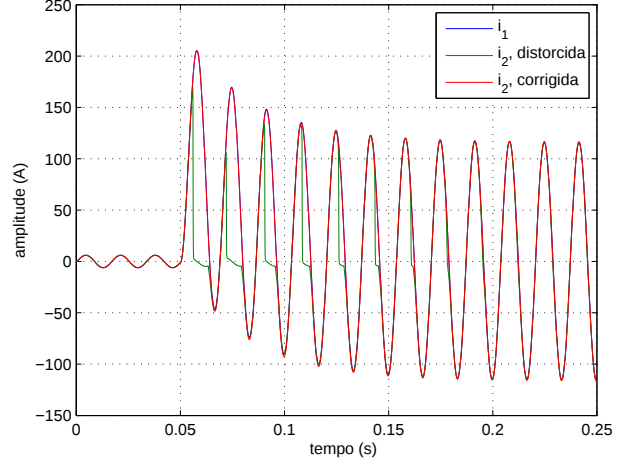
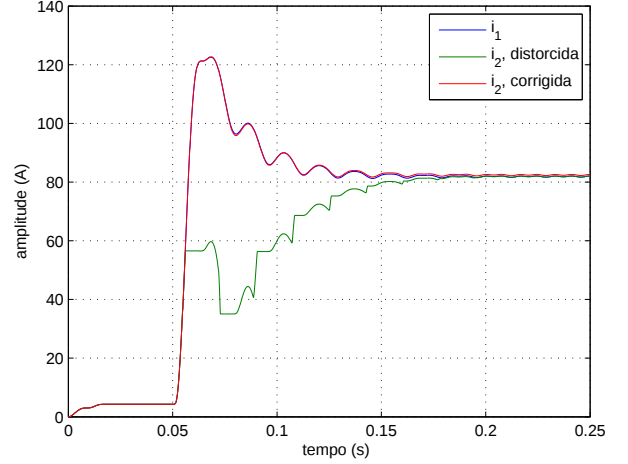
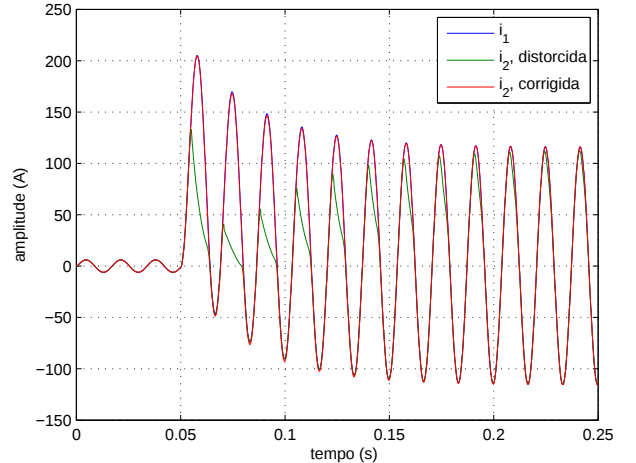
Equação (8) e (9) basicamente calculam, ponto a ponto, a diferença entre a corrente primária de falta e a corrente secundária distorcida ou corrigida, multiplicada pela relação de transformação do TC (RTC) e compara com a corrente primária de falta, todas em seus valores RMS.

As Figs. (8), (10) e (12) ilustram as formas de onda da corrente secundária distorcida e corrigida para as três condições de carga avaliadas, quando o ângulo de incidência de falta é 0° . Observa-se que o método apresenta um ótimo desempenho, corrigindo de forma satisfatória a corrente secundária distorcida. O desempenho geral do algoritmo de correção pode ser avaliado por uma análise dos erros percentuais para os valores RMS da corrente corrigida, apresentados na Tab. 3. Conforme pode ser observado, a técnica proposta corrige, efetivamente, para até 6% os erros máximos observados em todos os casos simulados

Os resultados apresentados mostram que o método proposto corrige de forma satisfatória os erros na corrente secundária de TCs operando em regime de saturação. Para a situação na qual a carga no secundário do TC é a nominal, observa-se que o erro foi o menor obtido para a metodologia apresentada.

VI. CONCLUSÕES

A técnica apresentada possibilita que a correção da saturação seja efetuada desde o primeiro trecho ciclo de falta, reduzindo significativamente os erros relacionados à saturação. Outra característica da metodologia apresentada é que a mesma não depende de conhecimento prévio das características do TC ou das condições da falta, tais como: burden, ângulo de incidência de falta e remanência.

Fig. 9: i_2 , corrigida e distorcida ($1.25 + j0.0 \Omega$).Fig. 10: i_2 RMS, corrigida e distorcida ($1.25 + j0.0 \Omega$).Fig. 11: i_2 , corrigida e distorcida ($0.50 + j1.25 \Omega$).

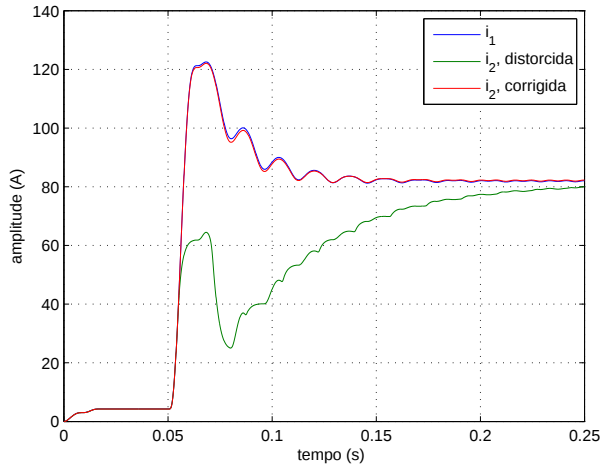


Fig. 12: i_2 RMS, corrigida e distortida ($0.50 + j1.25 \Omega$).

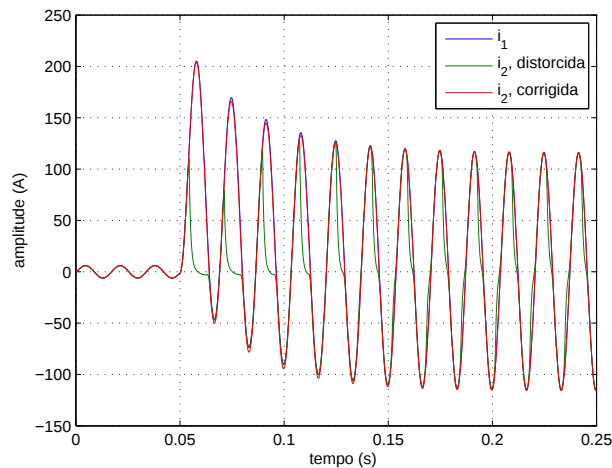


Fig. 13: i_2 , corrigida e distortida ($2.15 + j0.70 \Omega$).

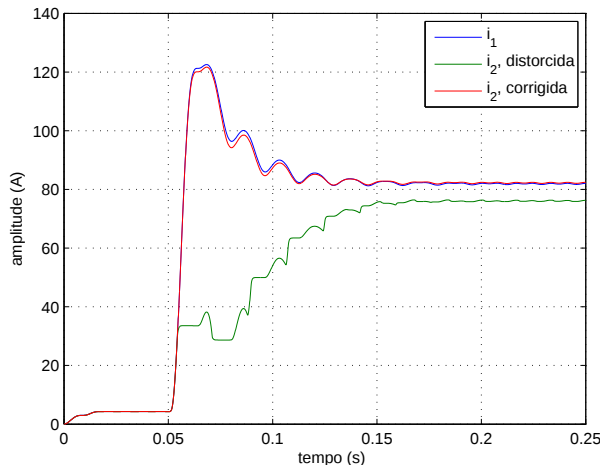


Fig. 14: i_2 RMS, corrigida e distortida ($2.15 + j0.70 \Omega$).

Os resultados apresentados reafirmam a eficiência da metodologia proposta que pode ser adaptada e implementada em IEDs, aumentando a confiabilidade e precisão dos esquemas de proteção.

VII. AGRADECIMENTOS

O autor agradece ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande (PPGEE/UFCG), e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro concedido.

BIBLIOGRAFIA

- [1] F. d. C. F. Guerra and W. S. Mota, "Current Transformer Model," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 22, no. 1, pp. 187-194, Jan. 2007.
- [2] F. A. Pereira, F. Guerra and E. G. Costa, "Uma nova técnica de correção de correntes distortidas no enrolamento secundário de TCS". Anais do XIX Congresso Brasileiro de Automação, CBA 2012;
- [3] Y. C. Kang, S. H. Ok, S. H. Kang and P. A. Crossley, "Design and evaluation of an algorithm for detecting current transformer saturation," in IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution, vol. 151, no. 1, pp. 27-35, 14 Jan. 2004.
- [4] F. d. C. F. Guerra and W. S. Mota; "Current Transform Model". IEEE Transactions on Power Delivery, v. 22, n. 1, p. 187-194, 2007;
- [5] H. J. Altuve, N. Fischer, G. Benmouyal and D. Finney, "Sizing current transformers for line protection applications," 2013 66th Annual Conference for Protective Relay Engineers, College Station, TX, 2013, pp. 36-51.
- [6] F. A. Pereira, F. C. F. Guerra, B. A. Sousa, E. N. A. Santos, N. S. D. Brito, U. A. Carmo, "Real time compensation algorithm for air-gapped current transformers saturation effects," Electric Power Systems Research, Volume 138, September 2016, Pages 188-194, ISSN 0378-7796.
- [7] F. Li, Y. Li and R. K. Aggarwal, "Combined wavelet transform and regression technique for secondary current compensation of current transformers," in IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution, vol. 149, no. 4, pp. 497-503, Jul 2002.
- [8] Jiuping Pan, Khoi Vu and Yi Hu, "An efficient compensation algorithm for current transformer saturation effects," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 19, no. 4, pp. 1623-1628, Oct. 2004.
- [9] U. D. Annakkage, P. G. McLaren, E. Dirks, R. P. Jayasinghe and A. D. Parker, "A current transformer model based on the Jiles-Atherton theory of ferromagnetic hysteresis," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 15, no. 1, pp. 57-61, Jan 2000.
- [10] A. Wiszniewski, W. Rebizant and L. Schiel, "Correction of Current Transformer Transient Performance," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 23, no. 2, pp. 624-632, April 2008.