

# ALGORITMO PARA PROTEÇÃO DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA UTILIZANDO TRANSFORMADA WAVELET DISCRETA

JEFERSON P. MARQUES<sup>1</sup>, CARLOS A. L. MENCO<sup>1</sup>, GHENDY CARDOSO JR<sup>1</sup>, RAFAEL CORRÊA<sup>2</sup>.

1. *Universidade Federal de Santa Maria (UFSM)*

2. *Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia – Campus Farroupilha*

1. Av. Roraima nº1000, Bairro Camobi, Santa Maria-Brasil, CEP:97105-900

E-mails: *jefersonjpm.ee@gmail.com, carloslazaroz86@gmail.com, ghendy@ufsm.br, Rafael.serra@gmail.com*

**Abstract**— This paper presents a new algorithm for power transformers protection, based on monitoring the variation of the last samples of the detail coefficients, called detail signals, the first level of decomposition of DWT. In situations of inrush current the variation of the detail signals are close to zero, on the other hand, in case of an internal fault the detail signals have an abrupt variation. Based on these characteristics the proposed algorithm can identify and distinguish the situations of transients in power transformers, mainly situations of inrush current and internal faults. The proposed algorithm has been thoroughly tested for various operation scenarios, showing how the algorithm is fast and efficient in distinguishing the different situations of transient tested.

**Keywords**— Power Transformer, Differential Protection, Discrete Wavelet Transform, Inrush Current.

**Resumo**— Este artigo apresenta um novo algoritmo para proteção de transformadores de potência, baseado no monitoramento da variação das últimas amostras do coeficiente de detalhe, chamadas de sinais de detalhes, do primeiro nível de decomposição da TWD. Em situações de energização do transformador a variação dos sinais de detalhes são próximas de zero, por outro lado, em situações de falta interna os sinais de detalhes apresentam uma variação brusca. Com base nessas características o algoritmo proposto pode identificar e distinguir as situações de transitórios em transformadores de potência, principalmente situações de energização e faltas internas. O algoritmo proposto foi testado exaustivamente para diversos cenários de operação mostrando-se rápido e eficiente na distinção das diversas situações de transitórios testadas.

**Palavras-chave**— Transformadores de Potência, Proteção Diferencial, Transformada Wavelet Discreta, Corrente de Inrush.

## 1 Introdução

Os transformadores de potência são equipamentos extremamente importantes para o funcionamento do Sistema Elétrico de Potência (SEP). Com isso, devido a sua importância e alto valor financeiro necessitam de um sistema de proteção confiável, seguro e rápido para evitar prejuízos durante situações de curtos-circuitos.

A proteção diferencial é a principal metodologia de proteção aplicada em transformadores de potência acima de 10 MVA devido ao seu princípio simples de operação e sensibilidade. Entretanto, a proteção diferencial apresenta problemas na identificação e distinção das correntes de inrush de faltas internas, o que pode levar a má-operação do sistema de proteção.

Nos últimos anos diversos trabalhos têm sido feitos para buscar melhorar o sistema de proteção de transformadores de potência, principalmente para a correta distinção das situações de energização e faltas internas.

Técnicas baseadas em Redes Neurais Artificiais têm sido bastante exploradas para a distinção entre correntes de inrush e faltas internas em transformadores, como mostra Tripathy (2010). Em Ashrafian (2012) é proposta uma técnica utilizando Transformada-S Hiperbólica para a classificação de situações

de faltas internas, externas e correntes de inrush. Técnicas alternativas baseadas no Gradiente da corrente diferencial, proposta por Alencar (2012) e Morfologia Matemática, proposta por Jing (2006) também têm sido testadas apresentando resultados satisfatórios.

Este trabalho apresenta um algoritmo utilizando Transformada Wavelet Discreta (TWD) para identificar e distinguir as correntes de inrush de faltas internas em transformadores de potência trifásicos. A TWD é aplicada nos sinais das correntes diferenciais das fases para obtenção das componentes de aproximação e detalhe. O algoritmo proposto utiliza as últimas amostras dos coeficientes de detalhe (sinais de detalhe) do primeiro nível de decomposição da TWD do tipo Daubechies. Um sistema de monitoramento da variação dos sinais de detalhe é utilizado para a identificação e discriminação dos transitórios envolvendo o transformador. O algoritmo foi implementado utilizando o software Matlab®, onde foram utilizados dados obtidos a partir de um sistema simulado no software EMTP/ATP. O algoritmo foi testado exaustivamente para diversas situações de operação e apresentou resultados altamente satisfatórios.

## 2 Desenvolvimento do Algoritmo

### 2.1 Transformada Wavelet Discreta

A Transformada Rápida de Fourier (Fast Fourier Transform - FFT) é uma ferramenta muito utilizada para encontrar as componentes de frequência de um sinal. Porém a FFT necessita que o sinal em análise seja periódico e que os sinais sejam analisados utilizando múltiplos da frequência fundamental. Entretanto, no SEP a maioria dos sinais provenientes de transitórios são não-periódicos, o que inviabiliza a aplicação da FFT em algumas situações, Jorge (2002).

Diversos estudos na área de processamento de sinais têm utilizado uma ferramenta poderosa e eficiente conhecida com Transformada Wavelet. Esta técnica surgiu como uma alternativa para os problemas encontrados pela FFT.

A Transformada Wavelet utiliza filtros passa-baixa e passa-alta para eliminar componentes de baixa e alta frequências do sinal. Os sinais resultantes da filtragem anterior são novamente filtrados fazendo uma divisão do sinal. O processo de filtragem do sinal é repetido até um número pré-determinado de vezes, Oliveira (2009). A Fig. 1 apresenta uma decomposição de um sinal utilizando TW, onde  $A_n$  representa os coeficientes de Aproximação e  $D_n$  os coeficientes de Detalhe dos níveis de decomposição da TWD.

A TW pode ser dividida em Transformada Wavelet Contínua (TWC) e Transformada Wavelet Discreta, onde a diferença entre elas esta na forma em que os parâmetros de translação e escala são discretizados, Oliveira (2009).

A TWC pode ser definida como:

$$TWC(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot g\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (1)$$

Onde  $x(t)$  é o sinal a ser analisado,  $t$ ,  $a$  e  $b$  são os parâmetros de tempo, escala e translação, respectivamente. O termo  $g(t)$  representa a wavelet mãe.

A TWD de um sinal discreto, é dada pela equação 2.

$$TWD(m, k) = \frac{1}{\sqrt{a_0}} \sum_n x(n) \cdot g\left(\frac{k-n}{a_0}\right) \quad (2)$$

Onde  $g(n)$  é a wavelet mãe e os parâmetros de escala e translação  $a$  e  $b$ , respectivamente, são funções de um parâmetro inteiro  $m$ ,  $a = a_0^m$  e  $b = n a_0^m$ .

A TW trabalha como um conjunto de filtros passa-banda com diferentes bandas de frequências. Com isto, a TW pode ser usada para obter os sinais não-estacionários e capturar as situações de transitórios em SEP precisamente.

Neste trabalho foi utilizado a TWD do tipo Daubechies 4 (db4) para a decomposição dos dados.

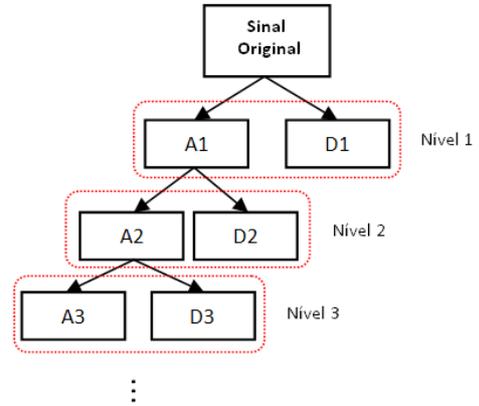


Figura 1: Decomposição TWD.

Dentre as diversas wavelets testadas a Daubechies apresentou melhores características e eficiência para a análise do problema em questão.

### 2.2 Método de Discriminação

A estrutura lógica do algoritmo é apresentada na Fig.3. Inicialmente o algoritmo faz um pré-processamento dos dados vindo dos TCs. Um filtro passa-baixa do tipo Butterworth com frequência de corte de 500Hz é aplicado nas correntes do secundário dos TCs para remover ruídos de altas frequências. Após, é feita a correção da defasagem angular proveniente da conexão  $\Delta$ -Y do transformador. Normalmente resolve-se esse problema fazendo a conexão do TC do lado  $\Delta$  do transformador em Y, e ligando o TC do lado Y do transformador em  $\Delta$ . Nas simulações foram utilizados TCs em Y em ambos os lados, sendo feita a correção de defasagem no algoritmo.

Para evitar desequilíbrios na corrente diferencial devido a faltas desequilibradas envolvendo a terra, foi feita a eliminação da componente de sequência zero do lado Y do transformador.

Após a etapa de pré-processamento, calcula-se as correntes diferenciais e verifica-se se houve extrapolação da corrente de restrição ( $I_R$ ), dada pela equação 3, onde  $I_{2P}$  e  $I_{2S}$  são as correntes do secundário dos TCs do lado primário e secundário do transformador, respectivamente. Havendo a extrapolação o algoritmo inicia a parte de detecção de transitório.

$$I_R = \frac{I_{2P} + I_{2S}}{2} \quad (3)$$

A detecção de transitório é baseada na análise e monitoramento das últimas amostras dos coeficientes de detalhe (chamadas neste trabalho de sinais de detalhe (SD)) do primeiro nível de decomposição (D1) da TWD. A utilização dos coeficientes de detalhes é

devido a estarem neles as componentes de alta frequência do sinal analisado.

Quando a TWD é aplicada, ela decompõe o sinal em coeficientes de detalhe e coeficientes de aproximação, e utilizando uma janela de dados deslizante, esses coeficientes vão sendo recalculados, e quando agrupados, os coeficientes irão se sobrepor podendo acarretar em erros. Com isso, para facilitar a análise dos dados e evitar erros de sobreposição é utilizado um vetor contendo somente os sinais de detalhes, como mostra a Fig. 2. Conforme a TWD vai sendo aplicada na janela de dados, a última amostra dos coeficientes de detalhe vai sendo atribuída a um vetor contendo os SD, e com isso, a variação dos sinais de detalhes ( $\Delta SD$ ) vai sendo calculada. O vetor de SD tem um tamanho fixo de 64 amostras, sendo que os dados são atribuídos de um em um até completar 64 amostras, após, somente é feita uma atualização conforme os novos dados chegam.

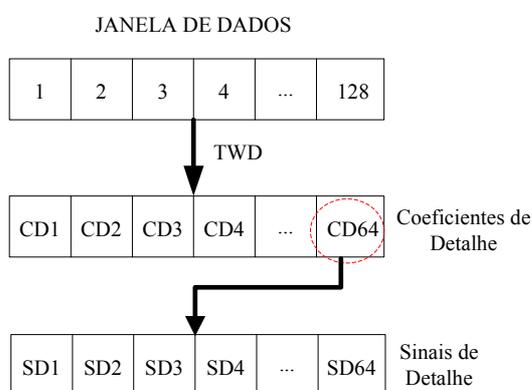


Figura 2: Janelas de dados

Utilizando a janela de sinais de detalhes de D1, é calculada a  $\Delta SD$  das amostras, dada pela equação 4. Com isso, a  $\Delta SD$  das fases da corrente diferencial é comparada com um limiar de ativação pré-definido ( $th = 1$ ), escolhido com base em testes. Caso a variação de qualquer um dos SD das fases seja maior que o limiar pré-definido, o algoritmo identifica como uma situação de falta interna e manda um sinal para a desconexão do transformador protegido. Se  $\Delta SD$  for menor que o limiar, o algoritmo identifica como uma situação de inrush e restringe a operação da proteção.

$$\Delta SD = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [SD(i) - \overline{SD}]^2} \quad (4)$$

Onde  $N$  é o número de amostras,  $SD$  os sinais de detalhes e  $\overline{SD}$  a média dos sinais de detalhes.

Tal sistema de proteção é possível devido que em situações de inrush os sinais de detalhes das correntes diferenciais apresentam uma variação próxima de zero, e em situações de falta interna os sinais de detalhes apresentam uma variação brusca.

Com isso o algoritmo de proteção proposto foi testado para diversas situações de operação mostran-

do-se rápido e eficiente na distinção de transitórios, como será apresentado a seguir.

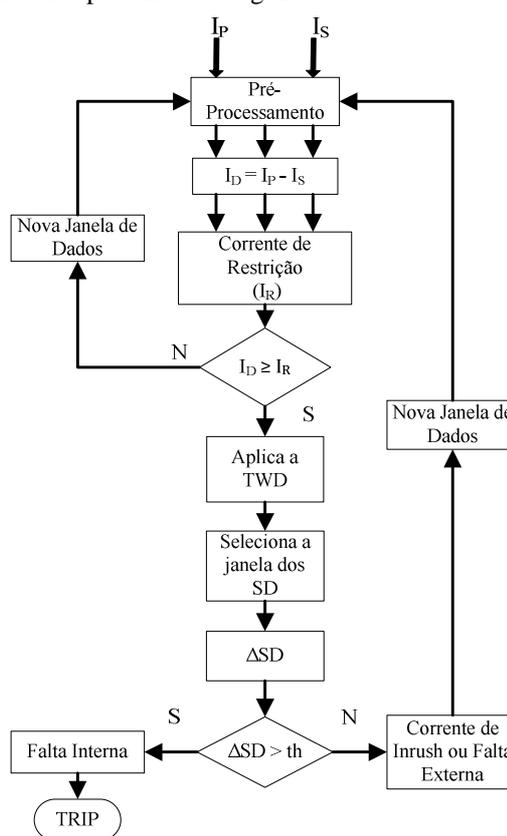


Figura 3: Fluxograma do algoritmo.

### 3 Simulações e Resultados

Para validação da metodologia proposta foi implementado o algoritmo utilizando o software Matlab® com base nos dados obtidos através da modelagem de um sistema no software EMTP/ATP.

O sistema elétrico de potência modelado consiste de um transformador de potência com conexão  $\Delta$ -Y, potência nominal de 250 MVA, tensão de 400/132 kV. Os TCs utilizados foram de 400:5 no lado primário e 1200:5 no secundário. A conexão dos TCs em ambos os lados foram feitas em Y, sendo a correção de defasagem feita no algoritmo, como mencionado anteriormente. A Fig. 4 mostra um diagrama unifilar do sistema simulado, assim como os locais onde foram realizadas os curto-circuitos.

As situações simuladas para testes no algoritmo foram:

- Energização à vazio;
- Energização com faltas internas e externas;
- Faltas internas e externas.

Em todas as situações foram obtidos dados variando-se o ângulo de incidência da tensão em  $0^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$  e  $135^\circ$ , assim como a resistência de curto-circuito em  $10\Omega$  e  $100\Omega$ , totalizando 1620 casos testados.

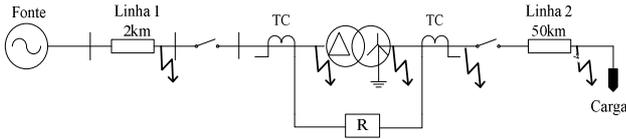


Figura 4: Sistema elétrico simulado.

### 3.1 Energização à vazio

As situações de energização foram simuladas com o lado secundário do transformador em aberto, ou seja, sem carga. Na Fig. 5 são apresentadas as características do formado de onda das correntes diferenciais em situação de inrush (a), assim como os sinais de detalhes de D1 das fases (b) e a variação dos sinais de detalhes (c).

Como pode ser visto no gráfico (5c) a variação dos sinais de detalhe das fases é próximo de zero, abaixo do limiar pré-estabelecido ( $th=1$ ), o que mostra a característica analisada no algoritmo permitindo uma identificação correta da situação de operação do transformador.

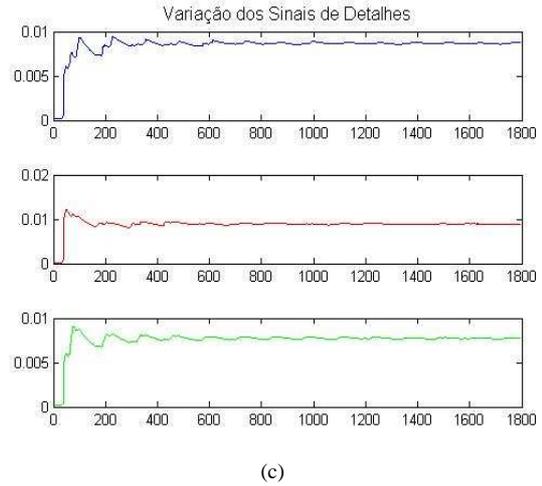
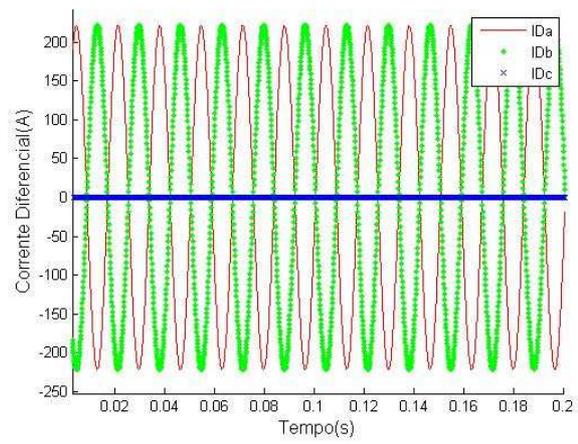
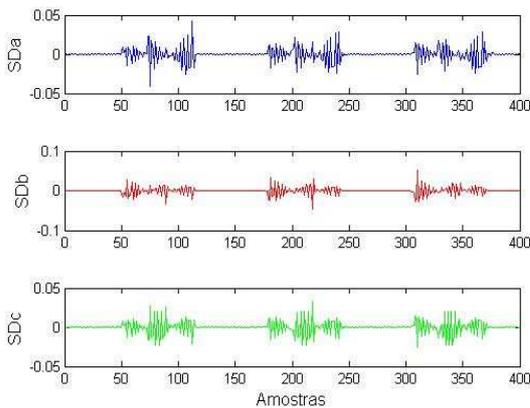
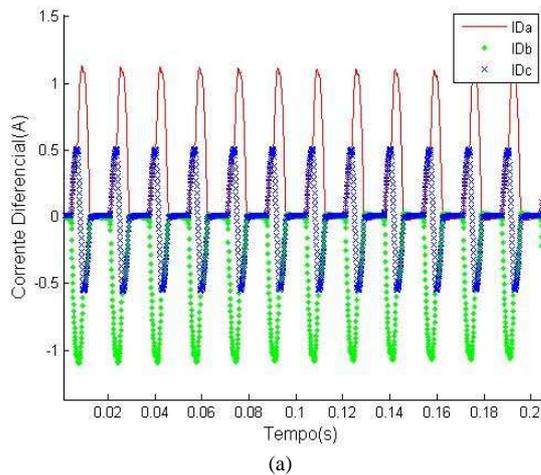


Figura 5: (a) Correntes diferenciais com inrush (ângulo de incidência de tensão:  $0^\circ$ ); (b) Sinais de detalhes das fases ABC; (c) Variação dos sinais de detalhes em situação de energização.

### 3.2 Energização com falta interna

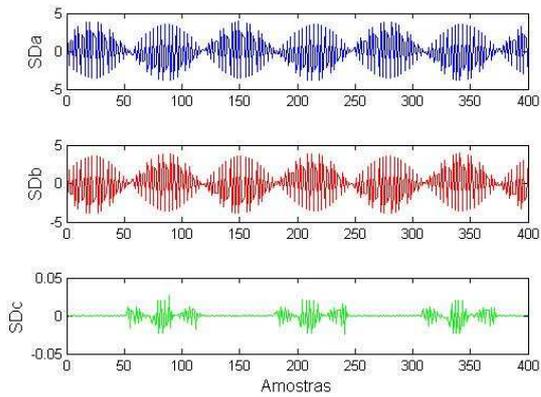
Nas situações de energização com falta interna, foi considerado que o lado secundário do transformador estava em aberto. Na Fig. 6 são apresentadas as características da onda da corrente diferencial das fases com energização com falta interna monofásica fase A (a), os sinais de detalhes das fases são mostrados em (b) e a variação dos sinais de detalhes em (c).

No gráfico (6c) pode-se notar que a variação dos sinais de detalhes em situação de falta interna ao transformador supera o limiar pré-definido ( $th=1$ ) no algoritmo de proteção. Outra característica é a identificação rápida da situação de energização com falta interna, pois nos primeiros dados é possível identificar a situação de curto-circuito.

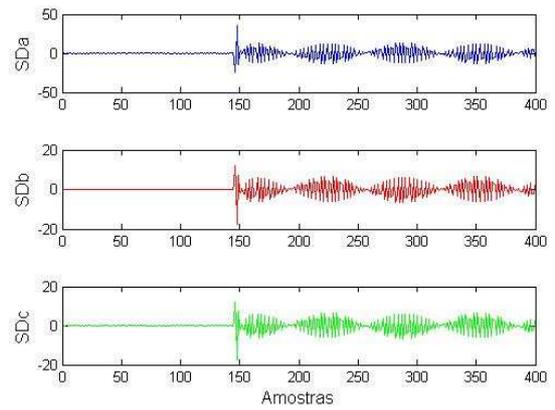


(b)

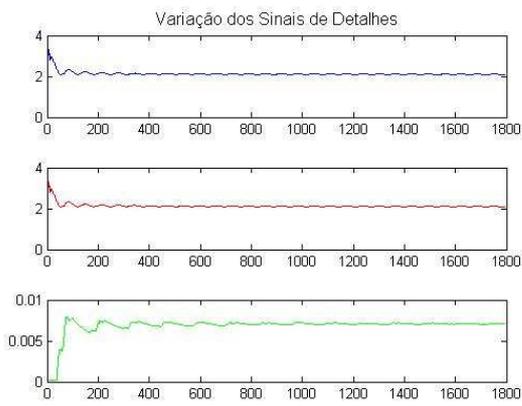
(a)



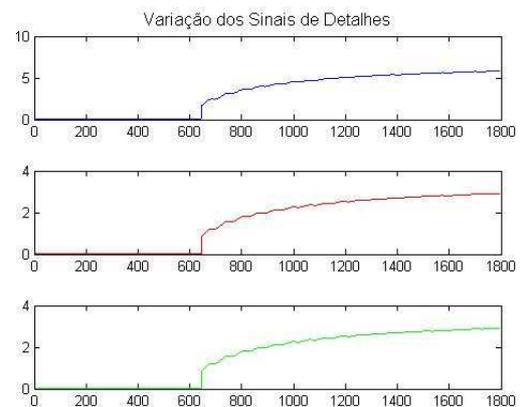
(b)



(b)



(c)



(c)

Figura 6: (a) Correntes diferenciais em situação de energização com falta interna (ângulo de incidência de tensão:  $90^\circ$ ); (b) Sinais de detalhes das fases ABC; (c) Variação dos sinais de detalhes.

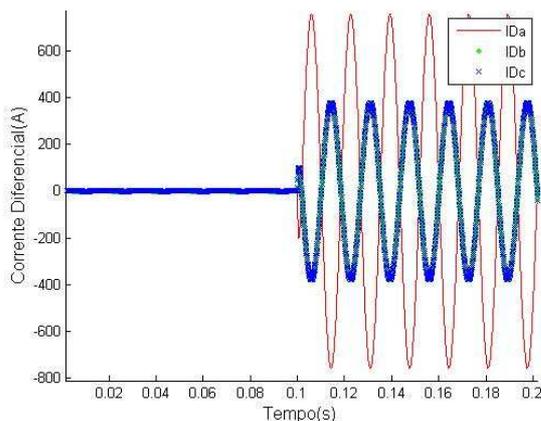
Figura 7: (a) Correntes diferenciais em situação de falta interna (ângulo de incidência de tensão:  $60^\circ$ ); (b) Sinais de detalhes das fases ABC; (c) Variação dos sinais de detalhes.

### 3.3 Falta interna

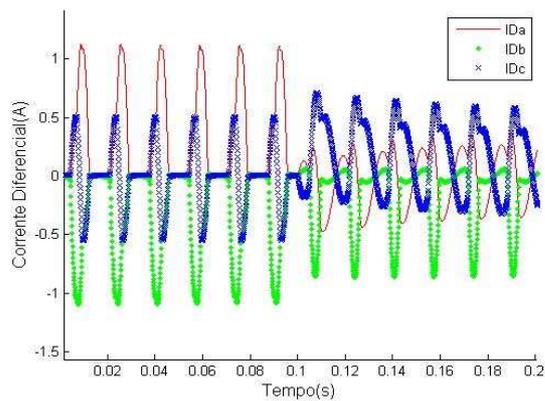
Uma situação de falta interna bifásica nas fases AC no lado primário é mostrada na Fig. 7, sendo que no lado secundário está conectada uma carga de 237,5 MVA, representando um carregamento de 95% do transformador. Como pode-se observar no gráfico (7c), no momento em que ocorre a falta há uma variação brusca dos sinais de detalhes, fazendo com que o valor da variação fique acima do limiar pré-definido ( $th = 1$ ). Com isso, o algoritmo identificou de maneira rápida e eficaz a situação de falta interna ao transformador.

### 3.4 Falta externa

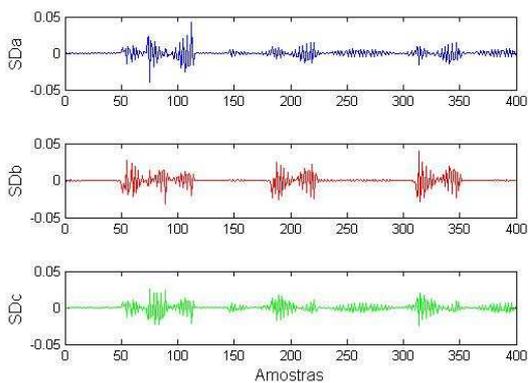
Na Fig.8 é apresentada uma situação de falta externa bifásica nas fases AC-terra no secundário do transformador, próxima ao TC, com uma carga de 12,5MVA, representando 5% do carregamento do transformador. Observando o gráfico (8a) pode-se notar que quando ocorreu a falta o formato de onda das correntes diferenciais ficaram distorcidas, isto se deve ao fato de que houve a saturação do TC. Segundo o gráfico (8c), mesmo com a situação de saturação do TC a variação dos sinais de detalhes ficaram próximos de zero. Sabe-se que em sistemas convencionais de proteção, a saturação do TC pode ocasionar na operação indevida do sistema de proteção. Desta maneira, o algoritmo proposto identificou corretamente a situação evitando a má operação da proteção.



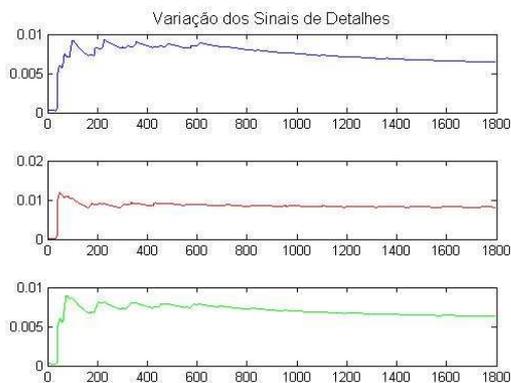
(a)



(a)



(b)



(c)

Figura 8: (a) Correntes diferenciais em situação de falta externa (ângulo de incidência de tensão:  $0^\circ$ ); (b) Sinais de detalhes das fases ABC; (c) Variação dos sinais de detalhes.

#### 4 Conclusão

Neste artigo foi apresentado um novo algoritmo para identificação e discriminação de transitórios envolvendo transformadores de potência trifásicos. O algoritmo foi testado através de diversas simulações para diferentes situações de operação do transformador com base em um circuito implementado no EMT/ATP.

O algoritmo proposto baseou-se no monitoramento da variação dos sinais de detalhe dos coeficientes de D1. A discriminação das situações de operação foi feita com base em um limiar pré-definido obtido empiricamente. Em situações de energização a variação

dos sinais de detalhe é próxima de zero, e em situações de falta interna ocorre uma brusca variação dos sinais de detalhe, ou seja, maior que o limiar pré-definido, fazendo com que o sistema de proteção atue. Situações de falta externa, inclusive com saturação do TC, também foram simuladas e o algoritmo identificou corretamente tal cenário.

Com isso, o algoritmo proposto apresentou-se extremamente eficiente e rápido na discriminação das situações de operação simuladas, tendo ainda a implementação relativamente simples, tornando-o promissor para aplicação na proteção de transformadores de potência em diferentes cenários de transitórios.

#### Referências Bibliográficas

- Tripathy, M, Maheshwari, R.P. Power Transformer Differential Protection Based on Optimal Probabilistic Neural Network. IEEE Trans. on Power Del., Vol.25, N<sup>o</sup>.1, Jan. 2010.
- Ashrafian, A., Rostami, M. and Gharehpetian, G.B. Hyperbolic S-transform-based method for classification of external faults, incipient faults, inrush currents and internal faults in power transformers. IET Generation, Transmission & Distribution, 2012, Vol. 6, Iss. 10, pp. 940-950.
- Alencar, R.J.N e Bezerra, U.H. Proteção Diferencial de Transformadores de Potência através do Gradiente da Corrente Diferencial. SBA Control & Automation.
- Jing, M., Yan, X., and Haofang, L. A Novel Adaptive Scheme of Discrimination between Internal Faults and Inrush Currents of Transformer Using Mathematical Morphology. IEEE Power Engineering Society General Meeting. Montreal, 2006.
- Jorge, D.C and Coury, D.V. Wavelet Transform Applied to Differential Protection of Power Transformers. XIV CBA – Congresso Brasileiro de Automática (Brazilian Conference on Automatic), Sept. 2002.
- Oliveira, M.O. Differential Protection of three-phase Transformers using Wavelet Transform UFRGS, Brazil, 2009.
- Rahmati, A. and Sanaye-pasand, M. New Method for Discrimination of Transformers Internal Faults from Magnetizing Inrush Currents using Wavelet Transform. Power System Technology and IEEE Power India Conference, 2008.
- Moa, P.L. and Aggarwal, R.K. A Novel Approach to the Classification of the Transient Phenomena in Power Transformer using Combined Wavelet Transform and Neural Network. IEEE Transactions Power Del., vol.16, n<sup>o</sup>4, pp.645-660, Oct. 2001.
- Eissa, M.M. A Novel Digital Directional Transformer Protection Technique Based on Wavelet Packet. IEEE Transactions Power Del., vol.20, n<sup>o</sup>3, pp.1830-1836, Jul. 2005.