

DIAGNÓSTICO DE FALTAS EM TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA UTILIZANDO SISTEMAS FUZZY

DANIEL BARBOSA, MURILO DA SILVA, ALEXANDRE P. BERNARDES, DENIS V. COURY E MÁRIO
OLESKOVICZ*

**Departamento de Engenharia Elétrica – EESC – USP*
Av. Trabalhador São-carlense, 400 - CEP 13566-590 - São Carlos - SP

Email: {dbarbosa,murisilva,coury,olesk}@sel.eesc.usp.br
alexandre_paciencia@yahoo.com.br

Abstract— This paper presents an alternative way for the differential digital protection of three-phase power transformers based on the use of Fuzzy Logic (FL). The approach distinguishes different situations characterized on these equipments, such as: energizing situation, inrush currents, internal and external faults. The computational simulations, as well as the modeling of the transformer, were accomplished using the *software* ATP. This utilization had as objective, to generate data for the most several and different situations for the verification and analysis of the proposed methodology.

Keywords— Fuzzy Logic, Differential Protection, Power Transformers.

Resumo— Este trabalho apresenta um meio alternativo para a proteção diferencial digital de transformadores trifásicos de potência baseado no uso da Lógica Fuzzy (LF). A abordagem permitirá distinguir dentre as distintas situações caracterizadas sobre estes equipamentos, tais como: energização (corrente de *inrush*), faltas internas e externas. As simulações computacionais, assim como a modelagem do transformador, foram realizadas utilizando-se do *software* ATP (*Alternative Transients Program*). Este teve por objetivo, gerar dados das mais diversas e distintas situações para a verificação e análise da metodologia proposta.

Palavras-chave— Proteção Diferencial, Lógica Fuzzy, Transformadores de Potência.

1 Introdução

Os transformadores de potência são equipamentos que necessitam de um monitoramento constante e especial devido à sua importante função perante o sistema elétrico associado. Deste modo, a proteção empregada nestes dispositivos deve ser rápida, confiável e capaz de detectar as ocorrências de faltas ou condições anormais que por ventura venham a comprometer o seu perfeito funcionamento ou a continuidade no fornecimento da energia elétrica.

Para a proteção primária desses elementos são utilizados freqüentemente os relés diferenciados. Tais mecanismos de proteção baseiam-se no princípio da comparação entre as correntes primárias e secundárias, em função de patamares pré-estabelecidos. Quando ultrapassados, o equipamento deve ser retirado de operação. Todavia, tal procedimento possui certas limitações na aplicação em transformadores de potência, devido as condições de operação dos equipamentos, e de situações características usualmente enfrentadas.

Correntes de energização (*inrush*), sobre- excitação, faltas externas combinadas com a saturação dos Transformadores de Corrente (TC's) na medição e o erro provocado pela relação de transformação do equipamento protegido são alguns dos fenômenos mais relevantes que provocam um considerável desbalanceamento entre as correntes primárias e secundárias, podendo causar uma atuação incorreta do relé (Kasztenny et al., 1997). Logo, a distinção dentre faltas internas das demais

situações acima mencionadas é uma das principais dificuldades encontradas na proteção diferencial em transformadores.

Todavia, alguns critérios podem ser utilizados para mitigar esses problemas, destacando-se os baseados na característica diferencial aprimorada com as restrições de segunda e quinta harmônicas. É importante salientar que além dos possíveis atrasos que os métodos de filtragem podem proporcionar para a obtenção das componentes harmônicas, as situações de faltas internas enfrentadas também podem conter componentes de segunda harmônica, o que também provocaria um provável erro no processamento da informação (Pihler et al., 1997).

Na tentativa de contornar tais problemas, diversas técnicas são utilizadas, incluindo ferramentas inteligentes, como Redes Neurais Artificiais (RNA's) e Sistemas Fuzzy. Tais métodos promovem uma melhora significativa na seletividade, sensibilidade e operação dos relés diferenciais, evidenciando possíveis soluções para alguns dos problemas citados (Segatto and Coury, 2005; Kaivathi et al., 2005).

Esse trabalho apresenta um algoritmo utilizando sistemas Fuzzy para diagnosticar faltas internas em transformadores de potência. Através de medições realizadas no circuito primário e secundário do mesmo, a técnica indica qual situação o equipamento se encontra, acusando, se necessário, a necessidade do envio do sinal de abertura (*trip*) para o disjuntor.

2 Proteção Diferencial

A lógica diferencial é uma das principais metodologias aplicadas à proteção de transformadores de potência, cuja base é a comparação entre as correntes que entram e saem do equipamento, conforme ilustra a Fig.1. A figura mostra também o esquema de conexão dos Transformadores de Corrente (TC's) acoplados em série aos ramos primário e secundário. Neste, $N_p : N_s$ é a relação de transformação entre o primário e o secundário do transformador protegido. Durante a operação

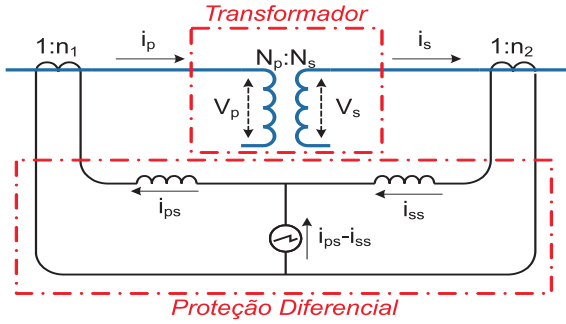


Figura 1: A proteção diferencial para transformadores.

normal do transformador e em caso de faltas externas, as correntes secundárias dos TC's (i_{ps} e i_{ss}) são iguais, desde que $N_p/N_s = n_2/n_1$. Todavia, no caso de ocorrência de faltas internas, a diferença entre as correntes será expressiva, provocando a sensibilização do relé. Neste caso, a corrente diferencial fornece uma medida confiável da corrente de falta e pode ser definida como:

$$i_d = i_{ps} - i_{ss}. \quad (1)$$

No entanto, associada a configuração como um todo, tem-se várias e prováveis fontes de erros, como os das relações de transformação, dos TC's de medição alocados e das mudanças de *tapes* quando evidenciadas. Tais imprecisões podem comprometer o funcionamento do sistema de proteção, proporcionando uma atuação errônea deste, pois pequenas correntes diferenciais podem surgir em condições normais de operação. Para corrigir esses problemas, fixa-se uma margem de segurança a partir da qual o relé deverá atuar, as quais são dadas pelas equações (2) e (3) abaixo:

$$i_d \geq K \quad (2)$$

$$i_d \geq \bar{K} \left(\frac{i_{ps} + i_{ss}}{2} \right) \quad (3)$$

onde K é a corrente mínima de operação e \bar{K} é a inclinação percentual diferencial.

A Fig. 2 ilustra uma característica do relé diferencial, incluindo as suas zonas de operação e restrição. Alguns ajustes de restrição \bar{K} também são apresentados na figura com o objetivo de

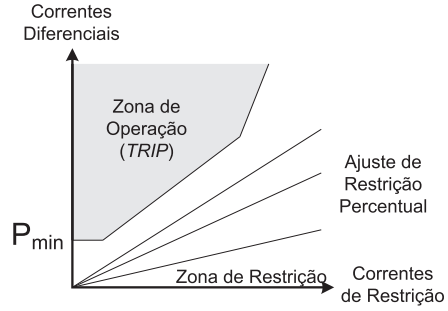


Figura 2: Curva característica da proteção diferencial.

acomodar possíveis correntes diferenciais provocadas pelos erros anteriormente citados. As falsas correntes diferenciais são causadas também por alguns tipos de manobras realizadas no transformador e por situações de faltas próximas a este. Tais circunstâncias podem promover elevadas correntes diferenciais, suficientes para provocar uma atuação indevida da proteção diferencial. As causas primordiais para o surgimento dessas correntes são listadas abaixo (Horowitz and Phadke, 1995).

2.1 Corrente de energização (*inrush*)

A corrente de energização, devido à magnetização e à saturação do núcleo do transformador quando do seu início de operação, tem a sua amplitude determinada pela inclinação da característica de magnetização na região saturada e pela indutância de escoamento do transformador. A tabela 1 apresenta alguns valores típicos de corrente de energização em transformadores de potência (Ribeiro, 1982).

Tabela 1: Corrente de energização em p.u.

Potência (kVA)	Lado de energização			
	Alta Tensão		Baixa Tensão	
	3φ	1φ	3φ	1φ
500	6,00	11,00	9,00	16,00
1.000	4,80	8,40	7,00	14,00
5.000	3,90	6,00	5,70	10,00
10.000	3,20	5,00	3,20	10,00
50.000	2,50	4,50	2,50	9,00

Como fato, tem-se que durante o procedimento de energização, o secundário do transformador permanece em aberto, o que causa o aparecimento de altas correntes diferenciais, as quais podem sensibilizar e operar indevidamente a proteção. Nesse sentido, estudos realizados por alguns pesquisadores mostram a predominância da componente de segundo harmônico nesta situação (Bronzeado et al., 1996), o que vem caracterizar a uma restrição da operação frente a condição apresentada.

2.2 Sobreexcitação do transformador

Durante a rejeição de carga e outras condições de operação, o transformador pode estar sujeito a so-

breensões em regime permanente. Nestas condições, é observado um alto conteúdo de harmônicos ímpares inseridos nas formas de onda coletadas, destacando-se as de 3ª e 5ª ordem. Nessa conjuntura, o transformador apresenta características não lineares que causam o aparecimento de correntes diferenciais indesejadas, que podem provocar uma má atuação da proteção diferencial (Blackburn and Domin, 2007).

2.3 Saturação dos TC's

Em algumas situações de faltas externas próximas aos TC's, as correntes registradas podem ser elevadas. Dado este fato, o TC alocado junto a ocorrência será levado à condição de saturação, criando mais uma vez uma falsa corrente diferencial que poderá ser mal interpretada pela filosofia de proteção adotada.

A saturação dos TC's também pode ser causada pela componente assimétrica da corrente de falta, de forma que, mesmo para baixas correntes de curto-circuito, sejam caracterizadas correntes diferenciais indesejadas e, como conseqüência, um erro de operação do sistema de proteção.

3 Sistemas Fuzzy e a Proteção Digital Diferencial

Os sistemas *Fuzzy* fazem parte, atualmente, de conceituadas e consolidadas áreas de pesquisas, como por exemplo, sendo amplamente utilizados em sistemas de controle e supervisão, uma vez que não é necessário a modelagem matemática do processo ao qual deseja-se aplicar tal técnica.

Reportando-se à proteção digital, os processos de inferência *Fuzzy* possibilitam que o relé atue rapidamente em situações de ocorrência de faltas internas ao transformador. As informações contidas nos dados coletados do sistema não são perdidos durante a realização do procedimento, o que possibilita resultados mais precisos que os obtidos com a aplicação de técnicas convencionais (Shin et al., 2003).

Cabe comentar que para a modelagem da filosofia diferencial proposta e a ser apresentada, todas as etapas referentes a lógica (aquisição de dados, filtragem, fuzzificação, inferência e defuzzificação) foram observadas até se chegar a decisão de abertura ou não do sistema.

Ressalta-se que o algoritmo proposto parte da disponibilização de relés monofásicos. Em decorrência desta situação, todos os procedimentos do sistema *Fuzzy* foram realizados para cada fase em específico.

3.1 Pré-Processamento

Quando da aquisição dos dados do sistema, realiza-se um pré-processamento das informações para a obtenção das entradas a serem direcionadas

ao sistema *Fuzzy*. Os dados resultantes deste processo são obtidos com a extração das componentes fundamentais e harmônicas das correntes primárias e secundárias sobre o transformador protegido através da aplicação da Transformada Discreta de *Fourier* (TDF), uma vez que a lógica diferencial aplicada utiliza tais componentes de frequência para a caracterização da situação observada. É importante verificar que a TDF é realizada de forma janelada (1 ciclo) e com passo fixo de uma amostra e que todo o processamento computacional posterior considera as informações de uma única janela.

3.2 Fuzzificação

A fuzzificação compreende a etapa de transformação das variáveis de entrada em conjuntos *Fuzzy*, incluindo as incertezas e imprecisões decorrentes do processo. A fidelidade à qualidade dos dados de entrada dependem diretamente dos conjuntos *Fuzzy* de entrada e de saída (Shin et al., 2003). A Fig. 3 ilustra um dos conjuntos de entrada obtido considerando as amplitudes da corrente diferencial fundamental e o maior componente de segundo harmônico das correntes primária e/ou secundária do transformador.

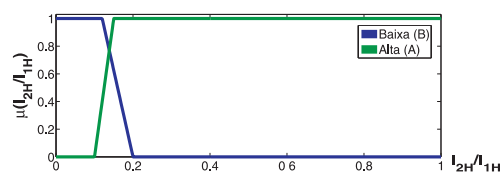


Figura 3: Função de pertinência da restrição de 2ª harmônica.

A lógica *Fuzzy* proposta utiliza as seguintes entradas de dados:

1. I_{1H} , I_{2H} , I_{3H} e I_{5H} : Amplitude da corrente diferencial fundamental e as maiores amplitudes da 2ª, 3ª e 5ª harmônica das correntes do primário ou secundário do transformador, respectivamente;
2. $I_{Flx} = \sum_{k=0}^{(N/2)-1} V_{n-k}$: A integral da amplitude da tensão em meio ciclo, refletindo o fluxo magnético do transformador, na qual N é o número de amostras por ciclo e n é o número da amostra analisada (Phadke and Thorp, 1983).

As entradas apresentadas exprimem as características básicas para a solução do problema, apesar da incerteza sobre o conteúdo harmônico refletido nas correntes. Contudo, vale comentar que em situações de correntes diferenciais indesejadas e de falta, as formas de onda distorcidas podem provocar erros na análise de Fourier utilizada, causando em conseqüência, erros na determinação dos parâmetros de entrada.

3.3 Métodos de Inferência

Foram utilizadas 18 regras de inferência para o desenvolvimento e caracterização do sistema proposto. Todas as regras são compostas por duas entradas com uma respectiva saída. Estas, por sua vez, foram classificadas em três grupos, de acordo com os tipos de restrição adotados. A Fig. 4 apresenta um sumário das regras *Fuzzy* utilizadas.

		2°, 3° e 5° Harm.		Fluxo		
		Baixa	Alta	Baixo	Normal	Alto
Corr. Difer.	Baixa	NF	NF	FT	NF	FT
	Alta	FT	NF	FT	NF	FT

Operação Normal (NF)
 Falta Interna (FT)

Figura 4: Resumo das regras de inferência *Fuzzy* adotadas.

Como por exemplo, uma regra típica para o relé em questão conforme a Fig. 4 apresentada é a seguinte:

SE Corrente Diferencial é *Baixa* **E** o fluxo magnético é *Alto*, **Então** a saída é *Falta*

Foi aplicado a técnica de *Max-Min* para a composição de inferência. Esta apresenta menor esforço computacional e rápido processamento. Fundamentos estes, essenciais para viabilizar a aplicação do algoritmo à proteção.

3.4 Defuzzificação

O procedimento de *defuzzificação* informa o valor numérico de saída do Sistema *Fuzzy*, o qual será utilizado para determinar a aplicação do sinal de *trip* ou bloqueio. Utilizou-se a técnica do centro de área para extrair tal informação, sendo este dado por:

$$CDA = \frac{\sum_{k=1}^N \mu_c(V_k) V_k}{\sum_{k=1}^N \mu_c(V_k)} \quad (4)$$

na qual N é o número de discretizações do universo de discurso do conjunto resultante das regras ativas (C) e μ o valor da função de pertinência no ponto desejado. A Fig. 5 mostra o diagrama de funcionamento básico do relé associado.

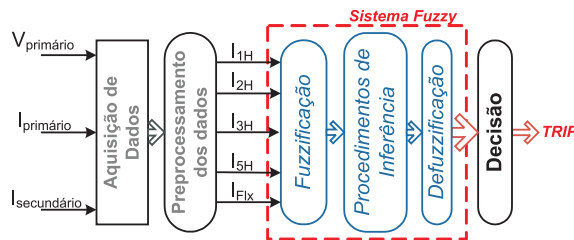


Figura 5: Diagrama básico do relé implementado.

3.5 Decisão de Trip

O sinal de *trip* é baseado na verificação do valor de saída monofásica com o limite de bloqueio, ou seja, se o valor da defuzzificação em alguma das fases for superior a 0.6, o relé envia um sinal para o disjuntor e este desconecta o transformador do sistema elétrico.

4 O Sistema Elétrico Analisado

A Fig. 6 ilustra o sistema elétrico modelado via ATP (*Alternative Transients Program*) para avaliar e validar a proteção diferencial pela aplicação do algoritmo desenvolvido a partir da teoria de Sistemas *Fuzzy*.

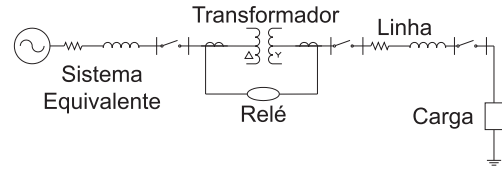


Figura 6: Sistema elétrico simulado via ATP.

O sistema elétrico é composto por um sistema equivalente, com tensão de 138kV e potência aparente de 30MVA, um transformador principal (elemento a ser protegido) com relação de transformação de 138kV/13.8kV e potência aparente de 25MVA, uma pequena linha de distribuição com 5km de extensão e uma carga caracterizada por fator de potência de 0,92 indutivo e potência aparente de 10MVA.

O transformador de potência é conectado com o primário em delta e o secundário em estrela aterrado baseado no modelo do ATP, o qual considera três transformadores monofásicos. Tal modelo considera a saturação do transformador a ser protegido e dos TC's de medição alocados para a aquisição dos dados, uma vez que a lógica diferencial implementada é influenciada pelo comportamento destes nas condições de saturação. Tal situação pode ser evidenciada tanto quanto na energização (corrente de *inrush*), quanto na ocorrência de faltas externas e próximas ao equipamento monitorado.

Cabe adiantar, que as simulações das situações de faltas internas foram obtidas dividindo-se os enrolamentos e as impedâncias de acordo com percentagens desejáveis à caracterização da falta, através da inclusão de chaves para a terra.

5 Análise dos Resultados

A proposta dessa seção é apresentar alguns resultados iniciais da abordagem proposta em diversos e distintos testes que foram realizados sobre o sistema anteriormente apresentado, dispondo de simulações pelo *software* ATP. Cabe comentar que

a frequência de amostragem empregada variou de 960 e 3720 Hz. As situações levantadas foram:

1. Energização sob falta à 10% do enrolamento primário do transformador;
2. Falta interna à 80% do enrolamento secundário do transformador à 79,23ms;
3. Falta interna bifásica AB à 50% do enrolamento secundário do transformador à 59,00ms;
4. Falta interna à 10% entre os enrolamentos primário e secundário do transformador.

5.1 Energização sob falta à 10% do enrolamento primário do transformador

A Fig. 7 ilustra a oscilografia das correntes primárias e secundárias obtidas através da simulação via ATP e o resultado obtido pelo algoritmo. Pode-se verificar pela figura o tempo de atuação do relé proposto, ou seja, o tempo entre a detecção de corrente diferencial e o *trip*. Nesta situação, o *trip* foi disparado, proporcionando a atuação correta da proteção no momento da energização sob falta do transformador.

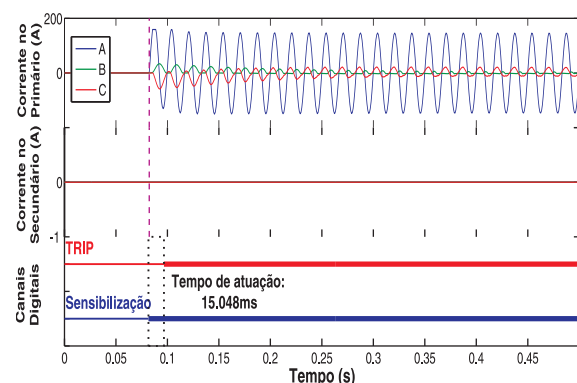


Figura 7: Energização sob falta à 10% do enrolamento primário.

5.2 Falta interna à 80% do enrolamento secundário do transformador à 79,23ms

Na Fig. 8 observa-se o comportamento do algoritmo perante a faltas próximas ao início do enrolamento secundário. É importante verificar que as amplitudes das correntes primária e secundária do equipamento se alteram rapidamente com a falta, evidenciando a necessidade de uma atuação rápida e precisa do sistema de proteção. Desta forma, o diagnóstico rápido desta situação impede que o surto provoque danos irreversíveis e conseqüente inutilização do equipamento. Nesse contexto, o algoritmo *Fuzzy* apresentou resultados satisfatórios, pois em menos de um ciclo o sistema foi capaz de detectar o problema.

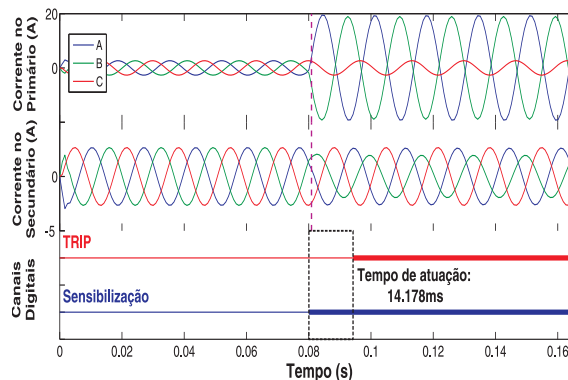


Figura 8: Falta interna à 80% do enrolamento secundário à 79,23ms.

5.3 Falta interna bifásica AB à 50% do enrolamento secundário do transformador à 59,00ms

Pela Fig. 9, observa-se o resultado do algoritmo proposto para uma situação de falta interna entre dois enrolamentos do secundário do transformador. Essa condição é fundamental para verificar a velocidade e confiabilidade da técnica frente a situações indesejadas severas. Desta forma, o algoritmo disparou o sinal *trip* e proporcionou a correta atuação do sistema de proteção.

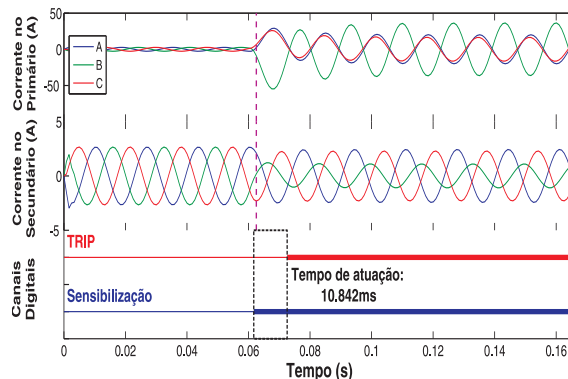


Figura 9: Falta interna bifásica à 50% do enrolamento secundário à 59,00ms.

5.4 Falta interna à 10% entre os enrolamentos primário e secundário do transformador

O resultado apresentado pela Fig. 10 ilustra as correntes obtidas para a condição de falta interna à 10% entre os enrolamentos primário e secundário do equipamento protegido. Neste é possível observar, ainda, a componente contínua (CC) característica de curto-circuitos desequilibrados. Através desta simulação, pode-se verificar a velocidade da proteção promovida pelo o algoritmo proposto, uma vez que este utilizou apenas 14,56ms para a tomada de decisão.

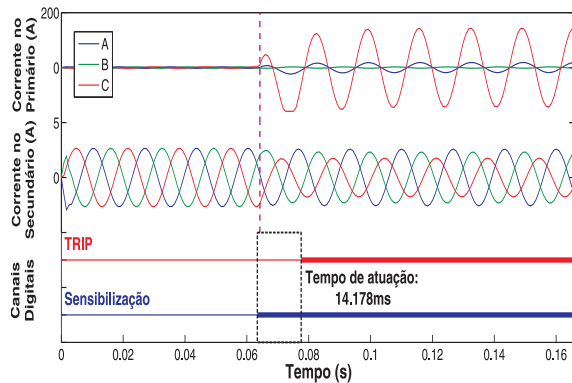


Figura 10: Falta interna entre os enrolamentos primário e secundário à 63,00ms.

6 Conclusões

Este trabalho descreve um sistema *Fuzzy* capaz de diagnosticar situações de faltas em transformadores trifásicos de potência. O emprego das regras de inferência e subrotinas baseadas em sistemas *Fuzzy* possibilitou a identificação correta das situações faltosas das demais condições de operação que geram ou não correntes diferenciais indesejadas. Os critérios utilizados pelo método consideram as restrições harmônicas, a curva da característica diferencial do equipamento e as variações de fluxo magnético no núcleo, incluindo limiares de atuação. Os dados utilizados para os testes foram obtidos por simulações computacionais através do *software* ATP, o que possibilitou a geração de diversas condições de operação do equipamento. Os resultados frente aos testes apresentados demonstram a alta sensibilidade e seletividade do algoritmo proposto, principalmente perante ao tempo de abertura do disjuntor em casos de falta interna. Nestes, ainda, verificou-se que o fator determinante no tempo de atuação do algoritmo é proporcionado pela estimativa das componentes harmônicas.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao Laboratório de Sistemas de Energia Elétrica (LSEE) da Escola de Engenharia Elétrica de São Carlos (EESC), Universidade de São Paulo (USP), pela infraestrutura proporcionada no desenvolvimento deste trabalho, bem como ao apoio financeiro recebido por parte do CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico).

Referências

Blackburn, J. L. and Domin, T. J. (2007). *Protective Relaying Principles and Applications*, 3 edn, CRC Press, Boca Raton.

Bronzeado, H. S., Brogan, P. B. and Yacamini, R. (1996). Harmonic analysis of transient currents during sympathetic interaction, *IEEE Transactions on Power Systems* **11**: 2051 – 2056.

Horowitz, S. H. and Phadke, A. G. (1995). *Power System Relaying*, 2ª edn, John Wiley e Sons Inc, New York.

Kaiavathi, M. S., Reddy, B. R. and Singh, B. P. (2005). Transformer fault diagnosis using fuzzy logic and neural network, *Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, pp. 486–489.

Kasztenny, B., Rosolowski, E., Saha, M. and Hillstrom, B. (1997). A self-organizing fuzzy logic based protective relay - an application to power transformer protection, *IEEE Transactions on Power Delivery* **12**(3): 1119–1127.

Phadke, A. G. and Thorp, J. S. (1983). A new computer-based flux-restrained current-differential relay for power transformer protection, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* **PAS-102**(11): 3624–3629.

Pihler, J., Gear, B. and Dolinar, D. (1997). Improved operation of power transformer protection using artificial neural network, *IEEE Transactions on Power Delivery* **12**(3): 1128–1136.

Ribeiro, C. F. (1982). *Correntes Transitórias de Energização dos Transformadores*, Curso Especial de Distribuição de Energia Elétrica, Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, Recife.

Segatto, . C. and Coury, D. V. (2005). A power transformer protection with recurrent ann saturation correction, *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, pp. 242–247.

Shin, M.-C., Park, C.-W. and Kim, J.-H. (2003). Fuzzy logic-based relaying for large power transformer protection, *IEEE Transactions on Power Delivery* **18**(3): 718–724.