

Rede Neural Artificial Aplicada à Proteção Diferencial de Transformadores de Potência

Aline F. Silva, Eduardo G. Silveira, Rafael Alípio

Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica - CEFET-MG – UFSJ, Minas Gerais, Brasil

(e-mail: alinefraga.mg@gmail.com)

Abstract: This paper presents a differential protection algorithm for power transformers based on Artificial Neural Network (ANN). The electrical systems studied were modeled and simulated using the Alternative Transient Program (ATP) software. The proposed protection scheme was applied on three transformers with rated powers of 100, 18, and 40 MVA. The following electromagnetic phenomena were simulated inrush, sympathetic inrush, overexcitation, saturation of current transformers (CTs), and faults internal and external the transformer protection zone. For each transformer, a database was generated with 1210 files for training and testing the ANN. This computational intelligence tool was implemented in MATLAB® software. The obtained results show that the developed methodology presented superior performance when compared to the conventional differential protection, proving to be a promising solution in this type of application.

Resumo: Este trabalho apresenta um algoritmo de proteção diferencial para transformadores de potência baseado em Rede Neural Artificial (RNA). Os sistemas elétricos estudados foram modelados e simulados no *software Alternative Transient Program* (ATP). O esquema de proteção proposto foi aplicado em três transformadores, com potências nominais de 100, 18, e 40 MVA. Foram simulados os seguintes fenômenos eletromagnéticos: energização, energização solidária, sobre-excitação, saturação de transformadores de corrente (TCs) e faltas internas e externas a zona de proteção. Para cada transformador foi gerado um banco de dados com 1210 arquivos para treinamento e teste da RNA. Essa ferramenta de inteligência computacional foi implementada no *software* MATLAB®. Os resultados obtidos mostram que a metodologia desenvolvida apresentou desempenho superior quando comparada à proteção diferencial convencional, mostrando-se como uma solução promissora neste tipo de aplicação.

Keywords: Differential Protection; Artificial Neural Network; Power Transformers; ATP.

Palavras-chaves: Proteção Diferencial; Rede Neural Artificial; Transformadores de Potência; ATP.

1. INTRODUÇÃO

Os transformadores são dispositivos que requerem manutenção especial devido à sua importância ao sistema elétrico no qual estão conectados. As falhas em transformadores de potência têm sido responsáveis por grandes blecautes no sistema elétrico brasileiro. Além disso, o elevado custo envolvido, a logística necessária e o tempo que se demanda para reparar uma unidade danificada são algumas das dificuldades decorrentes de uma falha em um transformador (Souza, 2012).

A Tabela 1 mostra a quantidade de desligamentos forçados em transformadores conectados ao Sistema Interligado Nacional (SIN), de acordo como o nível de tensão. Também são apresentadas a origem da causa dos desligamentos e a duração média.

Tabela 1. Desligamentos forçados de transformadores em 2011.

Tensão (kV)	Origem dos Desligamentos				Total	Duração média (h)
	Interna	Secundária	Externa	Operacional		
750	1	0	2	1	4	3,2
500	24	32	43	2	101	5,9
440	2	33	7	0	42	2,6
345	16	34	43	1	94	31,3
230	54	130	208	15	407	5,7
138	172	105	260	9	546	12,1

Fonte: ONS, 2012.

Os relés diferenciais são usados na proteção primária de grandes transformadores. Em tais relés, as correntes diferenciais são comparadas a um patamar preestabelecido e no caso de uma falta interna, o transformador deverá ser

desconectado do sistema elétrico (Segatto e Coury, 2006). Entretanto, a detecção de uma corrente diferencial pode não ser suficiente para distinguir faltas internas de outros eventos que também produzem tal corrente. Algumas destas situações surgem durante a energização do transformador (correntes de *inrush*), saturação dos TCs, entre outras, as quais podem resultar em um *trip* incorreto a partir do relé de proteção (Horowitz e Phadke, 2008).

Várias técnicas têm sido desenvolvidas e aprimoradas para melhorar a proteção diferencial do transformador de potência frente a situações especiais, como Transformada de Fourier e Mínimos Quadrados (Rahman e Jeyasurya, 1988), Lógica Fuzzy (Wiszniewski e Kasztenny, 1995), Transformada Wavelet (Oliveira, 2013), Máquina de Vetores de Suporte e Transformada Wavelet (Fernandes, 2017), Rede Neural Artificial (Segatto, 2005), entre outras.

Este trabalho tem como objetivo principal o aprimoramento da filosofia de proteção diferencial para transformadores de potência, através do desenvolvimento de um algoritmo baseado em RNA, que constitui uma nova e importante ferramenta na análise de relés diferenciais em busca de um melhor desempenho da proteção de transformadores de potência quando comparado ao desempenho da técnica convencional.

2. PROTEÇÃO DIFERENCIAL

Na proteção diferencial, as falhas são detectadas através da comparação de correntes que fluem dentro e fora da zona de proteção, onde se encontra o elemento protegido. A zona de proteção é definida como a região abrangida pelos TCs em ambos os lados do equipamento (Oliveira, 2013). Em alguns casos, a zona de proteção do relé diferencial pode ser estendida para incluir outros componentes próximos, como barramentos, atuando assim como uma proteção de retaguarda destes componentes (Santos, 2006).

A Fig. 1 mostra um esquema simplificado da proteção diferencial de transformadores com os TCs acoplados aos lados primário e secundário.

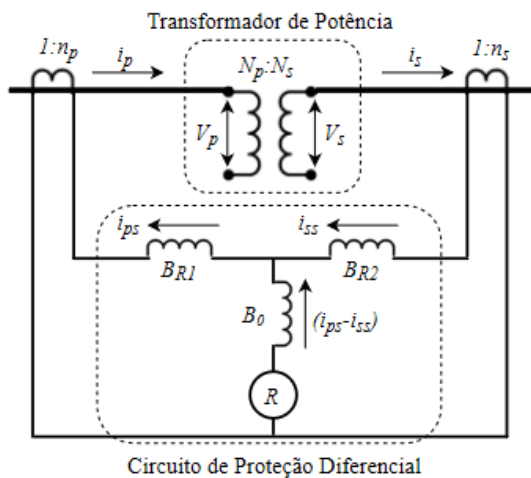


Fig. 1 - Conexões básicas de um sistema de proteção diferencial de transformadores.
Fonte: Adaptado de Oliveira, 2013.

De acordo com a Fig. 1, $N_p:N_s$ é a relação de transformação entre o primário e o secundário do transformador protegido, V_p e V_s são as tensões do primário e secundário, i_p e i_s são as correntes do primário e secundário, $1:n_p$ e $1:n_s$ são as relações de transformação dos TCs, B_{R1} e B_{R2} são as bobinas de restrição e B_0 é a bobina de operação do relé diferencial.

A corrente diferencial (I_{OP}) é dada por:

$$I_{OP} = i_{ps} - i_{ss} \quad (1)$$

Quando o transformador estiver operando em condições normais, as correntes provenientes dos TCs não são suficientes para sensibilizar o relé, uma vez que $i_{ps} \approx i_{ss}$ e sua diferença é praticamente nula. Porém, ao surgir uma corrente de fuga na zona protegida, como uma falta interna, a diferença entre as correntes i_{ps} e i_{ss} se torna significativa e caso seja maior que o valor limiar (*pick-up*) previamente definido, o transformador é desconectado do sistema elétrico de potência (SEP). Considerando a corrente de restrição (I_{RT}), o relé opera quando:

$$I_{OP} \geq k \cdot I_{RT} \quad (2)$$

O fator k representa a inclinação da característica diferencial do relé e geralmente é expresso em forma percentual cujos valores típicos de ajuste são: 10, 20, e 40% sendo que um relé com ajuste de 10% é mais sensível que um relé com ajuste de 40% (Horowitz e Phadke, 2008). A Fig. 2 mostra uma curva característica típica de operação do relé diferencial, incluindo as zonas de operação e restrição.

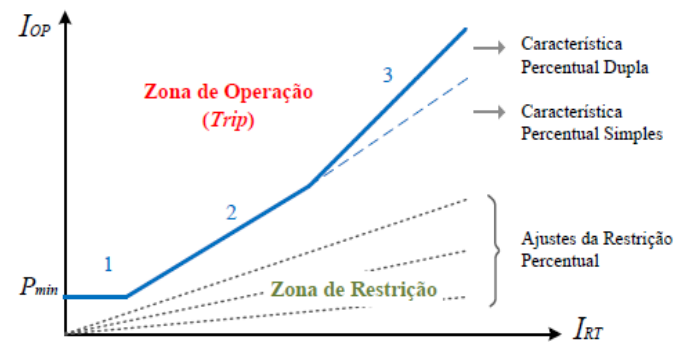


Fig. 2 - Curva característica de operação do relé diferencial.
Fonte: Oliveira, 2013.

Na Fig. 2, observam-se três regiões distintas para a característica percentual segundo Guzmán et al. (2001). A região (1) representa o valor de *pick-up* da corrente de operação mínima (P_{min}), utilizando-se geralmente 0,25 A, abaixo da qual o relé não deve operar. A região (2) é mais sensível e adequada para baixas correntes de carregamento, já que o erro introduzido pelos TCs é menor. A região (3) é a menos sensível e seu objetivo é acomodar os maiores erros introduzidos pelos TCs devido às altas correntes de carga e possível saturação em condições de faltas externas (Oliveira, 2013).

O relé diferencial percentual com restrição harmônica tem o objetivo de evitar a atuação da proteção nos casos de energização (correntes de *inrush*) e sobre-excitação. Os

valores do 2º e 4º harmônicos são monitorados e a operação do relé é restringida caso essas componentes harmônicas ultrapassem o valor de ajuste. A Fig. 3 mostra o resultado da aplicação da Transformada Discreta de Fourier ao sinal de corrente de uma das fases de um transformador real de 120 MVA, 230/34,5 kV durante a energização.

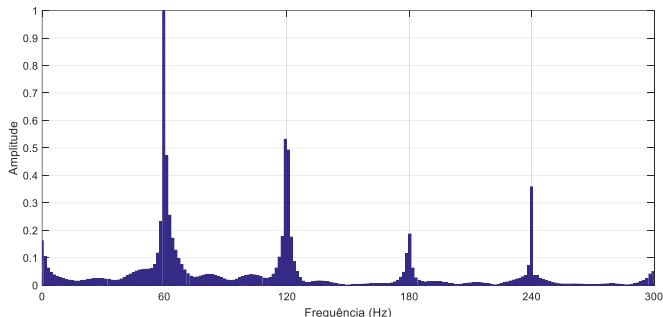


Fig. 3 - Frequências na energização de um transformador.

3. REDE NEURAL ARTIFICIAL

A rede de neurônios artificiais foi inspirada em conhecimentos sobre o cérebro humano. O mesmo possui as características de robustez, tolerância a falhas, capacidade de ajuste a novos ambientes pelo treinamento, capacidade para processar informações ruidosas, além de alta velocidade de processamento (McCulloch e Pitts, 1943).

O modelo de neurônio binário com limiar ρ unitário, mostrado na Fig. 4, foi desenvolvido por McCulloch e Pitts (1943). As entradas do neurônio artificial são ponderadas pelos pesos w_{ij} com as saídas do neurônio anterior ou com os sinais de entrada da rede. Para as saídas (n) foram estabelecidos os valores 1 ou 0 (estimulado ou não).

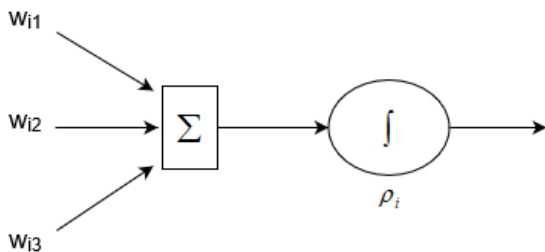


Fig. 4 - Modelo de neurônio binário.

Fonte: Adaptado de Segatto, 2005.

Os três elementos básicos do modelo de neurônio artificial são (Haykin, 2001):

1. Um conjunto de sinapses, cada uma caracterizada por um peso;
2. Um somador para somar os sinais de entrada, ponderados pelas respectivas sinapses do neurônio;
3. Uma função de ativação para restringir a amplitude da saída de um neurônio.

O peso w_{ij} é a força da sinapse conectando o neurônio j ao neurônio i . O valor ρ_i é o valor limiar específico da célula i . Quando o somatório dos pesos das entradas excede ou alcança o limiar, o neurônio é estimulado (Segatto, 2005).

O funcionamento da RNA consiste de um conjunto de células conectadas e com uma regra de propagação. Cada neurônio recebe suas entradas com os pesos associados, vindos de outros neurônios ou de estímulo externo (Segatto, 2005). O estado de ativação do neurônio é determinado pela função de saída ou de transferência. A função sigmoide é a forma mais comum de função de ativação utilizada na construção de RNAs. É definida com uma função estritamente crescente que exibe um balanceamento adequado entre comportamento linear e não-linear (Haykin, 2001).

A estrutura de processamento paralelo de informações permite a inclusão de conhecimento hábil no processo, a detecção e a classificação de sinais. A característica da RNA é, então, considerar o conhecimento adquirido durante o treinamento e responder a novos dados de entrada da maneira mais apropriada, concluindo assim, uma generalização do problema. A arquitetura de rede neural é definida pelo esquema de conexões e pesos correspondentes (Segatto e Coury, 2006).

4. METODOLOGIA

A seguir são descritos os procedimentos desenvolvidos para a obtenção dos resultados.

4.1 Sistema Elétrico Simulado

A Fig. 5 mostra o sistema elétrico simulado no *software* ATP para a geração do banco de dados utilizado na RNA. O sistema é constituído por um gerador trifásico com tensão nominal de 230 kV e frequência de 60 Hz. Essa fonte de tensão alimenta um transformador trifásico com potência nominal de 100 MVA e tensões de 230 kV no primário para 34,5 kV no secundário, com conexão Dyn1. Um trecho de linha de transmissão com 100 km de extensão interliga o gerador ao transformador. Os TCs conectados no transformador de potência são de 100/5 A no enrolamento primário e 1000/5 A no enrolamento secundário. Através de uma linha de distribuição, o transformador fornece energia para uma carga de 50 MVA e fator de potência de 0,92 indutivo.

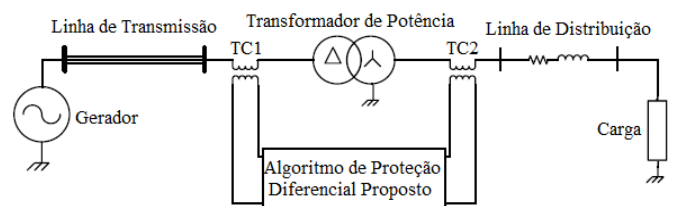


Fig. 5 - Sistema elétrico simulado.

Foram gerados um total de 1210 casos, sendo: 120 casos de energização, 120 casos de energização solidária, 100 casos de sobre-excitação (110 a 200% de sobretensão), 70 casos de saturação dos TCs, 400 casos de faltas externas e 400 casos de faltas internas (monofásicas, bifásicas fase-fase, bifásicas fase-terra e trifásicas com valores de resistência de falta de 0, 5, 10, e 20 Ω).

As Figs. 6 e 7 apresentam as correntes diferenciais provenientes de simulações realizadas no ATP para um caso de sobre-excitação (150% de sobretensão) e um caso de saturação dos TCs.

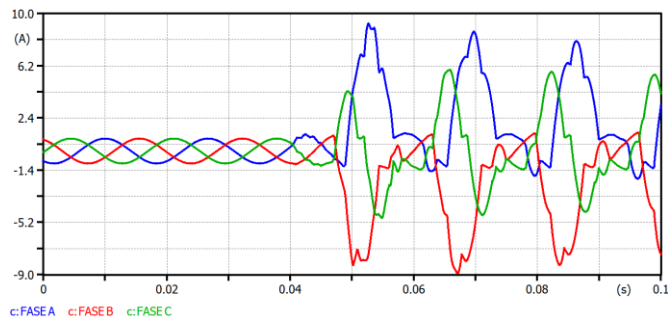


Fig. 6 - Caso de sobre-excitação do transformador.

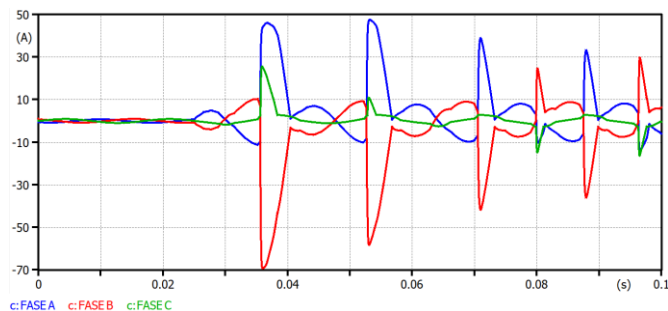


Fig. 7 - Caso de saturação dos TCs.

4.2 Algoritmo Proposto

A Fig. 8 mostra o fluxograma do algoritmo proposto para o relé diferencial, baseado em RNA.

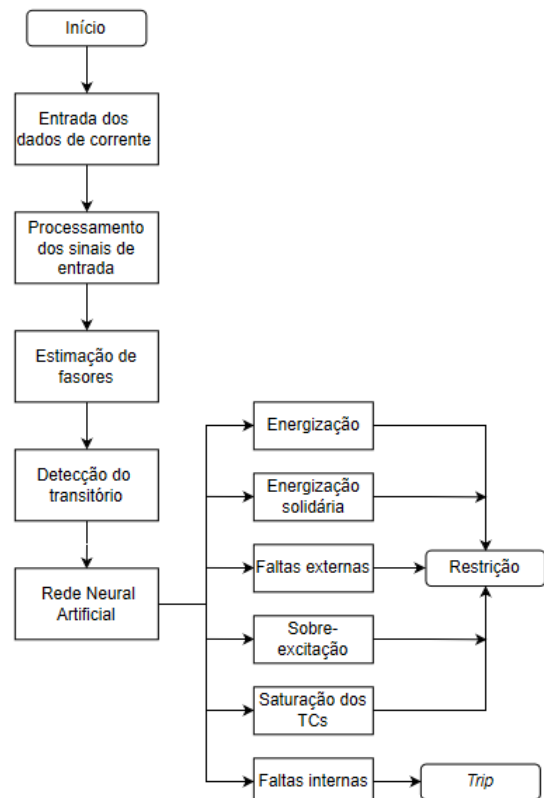


Fig. 8 - Fluxograma do algoritmo proposto.

O algoritmo inicia-se com a leitura dos arquivos de dados das simulações em formato “.out”. Antes de utilizar os sinais de entrada no algoritmo, o pré-condicionamento correto desses dados é essencial. A etapa de pré-processamento de dados envolve as seguintes etapas: filtragem passa-baixa e interpolação dos dados filtrados.

A metodologia utilizada na detecção do evento analisado foi baseada na estimação fasorial, que determina o instante inicial da ocorrência do evento através de um monitor de transitórios (Silveira, 2007). Para realizar a tarefa de estimação de fasores foi implementada uma variação do método dos mínimos quadrados (Sachdev e Baribeau, 1979).

O monitor de transitórios registra os resíduos gerados e soma seus módulos a cada janela de dados, de forma que (Phadke e Thorp, 1988):

$$M_k = \sum_{i=0}^{NPC-1} |r_{k-i}| \quad (3)$$

onde:

M_k = valor do monitor de transitórios em cada instante k ;

r_{k-i} = resíduo gerado pela amostra $k-i$ da janela de dados;

NPC = número de pontos amostrados por ciclo da fundamental.

A Fig. 9 mostra o monitor de transitórios para uma falta externa monofásica AT com resistência de falta de 5Ω .

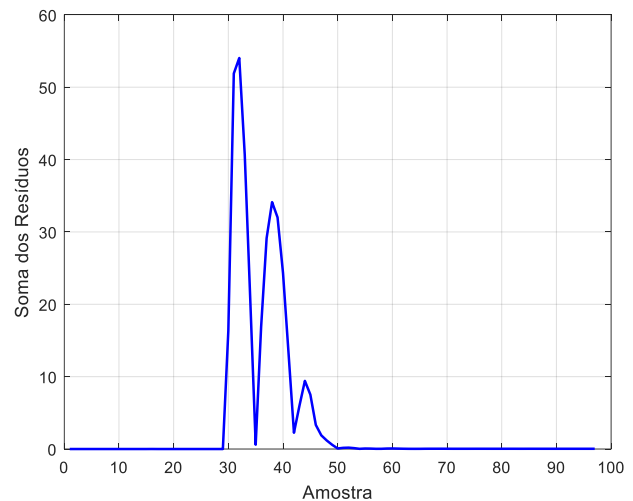


Fig. 9 - Evolução do monitor de transitórios para uma falta externa monofásica AT com resistência de falta de 5Ω .

A RNA foi desenvolvida através do *toolbox* do MATLAB®. A organização dos dados para a formação da entrada da RNA requer a normalização das grandezas entre 0 e 1. Esse procedimento é importante quando há muitos dados dispersos na variável. Além disso, valores altos podem saturar a função de ativação.

O número de neurônios da camada de entrada corresponde à quantidade de dados do vetor de entrada. Foram utilizadas 8 amostras consecutivas de cada fase da corrente diferencial, na frequência amostral de 960 Hz, a partir do instante de

detecção do evento simulado. Aplicou-se, também, janela de dados com 2 movimentos para cada fase. Na segunda janela, descartou-se o primeiro valor e adicionou-se o próximo, como ilustrado na Fig. 10. É importante ressaltar que a quantidade de amostras para o vetor de entrada foi determinada empiricamente.

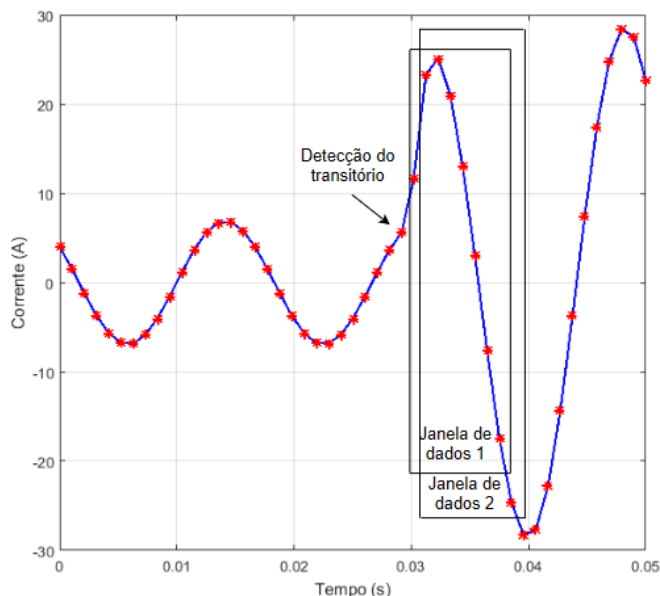


Fig. 10 - Janela de dados.

Para melhorar o desempenho do algoritmo, a rede neural foi modularizada, isto é, um módulo de classificação foi criado para cada tipo de evento simulado, em um total de 6.

Do total de casos simulados (1210 arquivos), 80% foram utilizados para treinamento e 20% nos testes.

O algoritmo escolhido para o treinamento da RNA é o *Backpropagation Levenberg-Marquardt*. A rede é do tipo *multilayer perceptron* com conexão *feedforward* entre os neurônios. As funções de ativação escolhidas para a camada oculta e a camada de saída são *tansig* (função sigmoideal) e *purelin* (função linear), respectivamente. A função *tansig* para os neurônios da camada oculta é frequentemente usada para problemas de reconhecimento de padrões, enquanto que a função *purelin* para os neurônios da camada de saída é utilizada para problemas de ajuste de função.

Os *targets* para treinamento foram definidos em 1 (para o evento desejado) e 0 (qualquer evento diferente). Na fase de validação, definiu-se para cada módulo que saídas iguais ou maiores que 0,5 indicam que o caso testado corresponde ao fenômeno para o qual o módulo foi treinado.

5. RESULTADOS

Várias topologias de redes neurais foram testadas em cada módulo para obter o melhor desempenho. A Tabela 2 apresenta a topologia definida para cada módulo da RNA. É importante ressaltar que essa topologia foi estabelecida sendo treinada e testada com os casos do sistema elétrico simulado, que possui um transformador de 100 MVA.

Tabela 2. Topologia da RNA.

Módulo RNA	Camada de Entrada	Camada Oculta	Camada de Saída
Energização	24	23	1
Energização Solidária	24	34	1
Faltas Externas	24	20	1
Faltas Internas	24	21	1
Saturação	24	14	1
Sobre-excitação	24	15	1

Em todos os módulos da RNA, o critério de parada do algoritmo foi estabelecido com base na validação, que é um indicador importante para a análise do desempenho da rede. Durante o treinamento, quando a capacidade de generalização da rede neural parou de melhorar e alcançou 6 falhas, o treinamento foi interrompido.

A Tabela 3 apresenta os resultados do Teste I, realizado empregando dados do transformador de 100 MVA e a topologia da RNA mostrada na Tabela 2.

Tabela 3. Desempenho do Algoritmo Proposto: Transformador de 100 MVA - Teste I.

Módulo RNA	Número de Padrões	Acerto	Erro	Falso Positivo
Energização	24	24	0	0
Energização Solidária	24	22	2	0
Faltas Externas	80	80	0	0
Faltas Internas	80	80	0	0
Saturação	14	14	0	0
Sobre-excitação	20	20	0	0
Total	242	240	2	0

Para validar o algoritmo proposto, foram realizados os Testes II e III. O banco de dados gerado para cada um desses testes é semelhante ao criado para o transformador do Teste I, descrito na Subseção 4.1. Para a simulação da RNA foi empregada a topologia apresentada na Tabela 2. No entanto, os arquivos aplicados no algoritmo para as etapas de treinamento e testes são referentes a cada transformador em estudo.

O Teste II utiliza casos simulados de um sistema elétrico com transformador de 18 MVA - 138/13,8 kV, conexão estrela-delta (Y/Δ). O sistema elétrico analisado no Teste III possui um transformador de 40 MVA - 138/13,8 kV, conexão estrela-estrela aterrada (Y/Y). Os sistemas elétricos simulados nos Testes II e III possuem a mesma topologia do sistema elétrico apresentado na Fig. 5.

A Tabela 4 apresenta a eficiência do algoritmo proposto em cada teste, calculada da seguinte forma:

$$\varepsilon(\%) = \left(1 - \frac{n^\circ \text{erros} + n^\circ \text{falsos positivos}}{\text{total casos}} \right) \cdot 100 \quad (4)$$

Tabela 4. Eficiência do Algoritmo Proposto.

Teste	Eficiência (%)
Teste I	99,17
Teste II	97,52
Teste III	91,32

A metodologia proposta foi comparada com a técnica convencional de proteção diferencial que utiliza o algoritmo de Fourier de um ciclo. Para melhorar o desempenho do relé convencional, implementou-se a proteção diferencial com restrição dos harmônicos de 2ª e 4ª ordem.

A proteção diferencial com restrição harmônica entra em operação quando é satisfeita a seguinte condição:

$$I_{OP} > k \cdot I_{RT} + k_2 \cdot I_2 + k_4 \cdot I_4 \quad (5)$$

onde:

I_2, I_4 = corrente harmônica de 2ª e 4ª ordem, respectivamente.

k_2, k_4 = constante de proporcionalidade que relaciona a corrente fundamental às correntes harmônicas, expressa por:

$$k_n = \frac{100}{PCT_n} \quad (6)$$

onde:

PCT_n = valor de bloqueio do harmônico de ordem n .

Em relação ao PCT_n , os valores são baseados nos resultados obtidos das simulações do sistema elétrico no ATP. Assim, foi possível determinar através das formas de ondas geradas na simulação o percentual de harmônicas de cada ordem. Portanto, o valor de PCT_n depende das condições do sistema onde está inserido o transformador. Os valores definidos para este trabalho são mostrados na Tabela 5.

Tabela 5. Valores de PCT_n .

Transformador	PCT_2 (%)	PCT_4 (%)
100 MVA	70	25
18 MVA	60	25
40 MVA	45	20

A Tabela 6 apresenta o desempenho obtido pelo algoritmo com restrição harmônica para o transformador de 100 MVA (Teste IV). O algoritmo com restrição harmônica também foi testado com os dados dos transformadores de 18 MVA (Teste V) e 40 MVA (Teste VI). A Tabela 7 apresenta a eficiência obtida pelo algoritmo em cada teste, definida como segue:

$$\varepsilon(\%) = \left(\frac{n^\circ \text{trip} \text{ Faltas Internas} + n^\circ \text{ não trip}}{\text{total casos}} \right) \cdot 100 \quad (7)$$

Tabela 6. Desempenho do Algoritmo com Restrição Harmônica: Transformador de 100 MVA - Teste IV.

Casos Testados	Número de Padrões	Trip	Não Trip
Energização	24	9	15
Energização Solidária	24	12	12
Faltas Externas	80	0	80
Faltas Internas	80	80	0
Saturação	14	0	14
Sobre-excitação	20	0	20
Total	242	101	141

Tabela 7. Eficiência do Algoritmo com Restrição Harmônica.

Teste	Eficiência (%)
Teste IV	91,32
Teste V	90,49
Teste VI	85,54

Comparando-se os resultados obtidos nas Tabelas 4 e 7, pode-se afirmar que o algoritmo proposto apresenta desempenho superior à técnica convencional.

6. CONCLUSÕES

As concessionárias de energia elétrica avaliam e monitoram as interrupções em seus sistemas elétricos para melhorar a qualidade do fornecimento de energia. As faltas em transformadores de potência causam prejuízos, devido ao custo da energia não entregue, da sua função social além de afetar a cadeia produtiva. No Brasil, as concessionárias têm gastos expressivos com compensações pagas aos consumidores quando os índices de interrupções ultrapassam os limites dos indicadores de continuidade, estabelecidos pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) no Módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição (PRODIST).

Os algoritmos dos relés diferenciais convencionais apresentam ineficiências operacionais, provocando a atuação indevida em situações não faltosas. A aplicação do algoritmo proposto para o transformador de 100 MVA obtém um índice de acertos de 99,17%. Ainda, para validar a metodologia desenvolvida, foram treinados e testados casos de outros dois sistemas elétricos, um com transformador de 18 MVA e outro com transformador de 40 MVA, cujas eficiências obtidas são de 97,52% e 91,32%, respectivamente.

Para realizar um estudo comparativo com o algoritmo proposto, é implementado um algoritmo convencional com restrição harmônica que utiliza componentes de 2ª e 4ª ordem. O desempenho alcançado com o algoritmo convencional é inferior ao algoritmo proposto, apresentando eficiências de 91,32% para o transformador de 100 MVA, 90,49% para o transformador de 18 MVA e 85,54% para o transformador de 40 MVA.

Logo, o algoritmo proposto se apresenta como uma importante ferramenta na análise de relés diferenciais para melhorar o desempenho da proteção do transformador de

potência. Os resultados obtidos comprovam a eficiência do algoritmo, considerando aspectos como aplicabilidade e precisão. A metodologia mostrou-se viável para utilização na proteção de transformadores, sendo necessários testes adicionais para utilização em *hardware*, como verificação da velocidade de processamento, pois os relés de proteção trabalham *online* e em tempo real.

REFERÊNCIAS

- Fernandes, J. F. (2017). *Proteção Diferencial de Transformadores de Potência Baseada em Máquinas de Vetor de Suporte e Transformada Wavelet*. 93 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e de Computação) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.
- Guzmán, A. et al. (2001). Current-based Solution for Transformer Differential Protection. Part I: Problem Statement. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 21, n. 8, p. 485-491.
- Haykin, S. (2001). *Neural Networks: Principles and Practice*. 2. ed. Porto Alegre: Bookman.
- Horowitz, S. e Phadke, A. G. (2008). *Power System Relaying*. 3. ed. Baldock: Research Studies Press.
- McCulloch, W. S. and Pitts, W. (1943). A Logical Calculus of the Immanent Ideas in Nervous Activity. *Bulletin of Mathematical Biophysics*, 5: 115-133.
- Oliveira, M. O. (2013). *Proteção Diferencial Adaptativa de Transformadores de Potência Baseada na Análise de Componentes Wavelets*. 123 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Operador Nacional do Sistema (ONS). (2012). *RE 03/202/2012: Análise Estatística dos Desligamentos Forçados do Sistema Elétrico Brasileiro – Referente ao Ano de 2011*. Brasília: ONS.
- Phadke, A. G. and Thorp, J. S. (1988). *Computer Relaying for Power Systems*. New York: John Wiley & Sons Inc.
- Rahman, M. A. and Jeyasurya, B. (1988). A State-of-the-art Review of Transformer Protection Algorithms. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 3, n. 2, p. 534-544.
- Sachdev, M. S. and Baribeau, M. A. (1979). The New Algorithm for Digital Impedance Relays. *IEEE Trans. PAS-98*, p. 2232-2240.
- Santos, C. I. (2006). *Modelagem do Relé de Proteção Diferencial BDD15B-GE*. 87 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife.
- Segatto, Ê. C. (2005). *Relé Diferencial para Transformadores de Potência Utilizando Ferramentas Inteligentes*. 187 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- Segatto, Ê. C. e Coury, D. V. (2006). A Differential Relay for Power Transformers using Intelligent Tools. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 21, n. 3, p. 1154-1162, 2006.
- Silveira, E. G. (2007). *Localização de Faltas em Linhas de Transmissão: Desenvolvimento de Novos Algoritmos e Implementação de Sistema Computacional para Aplicações Práticas*. 188 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- Souza, J. R. M. S. (2012). *Desenvolvimento de uma Metodologia para a Avaliação da Confiabilidade dos Ajustes de Relés Diferenciais de Transformadores Baseada no Método de Monte Carlo*. 133 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- Wiszniewski, A. and Kaszteny, B. (1995). A Multi-criteria Differential Transformer Relay Based on Fuzzy Logic. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 10, n. 4, p. 1786-1792.