Serviço de Pós-Graduação EESC/USP

EXEMPLAR REVISADO

Data de entrada no Serviço: 29/04/03

Ass.:

TRANSFORMADAS WAVELET APLICADAS À PROTEÇÃO
DIFERENCIAL DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA

DAVID CALHAU JORGE

Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da
Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para
obtenção do Título de Doutor em Engenharia Elétrica

ORIENTADOR: Prof. Tit. Denis Vinicius Coury

São Carlos

2003

DEDALUS - Acervo - EESC

31100043087

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **DAVID CALHAU JORGE**

Tese defendida e julgada em 28-03-2003 perante a Comissão Julgadora:

Prof. Tit. **DENIS VINICIUS COURY (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

APROVADO

Prof. Dr. **ADRIANO ALBER DE FRANÇA MENDES CARNEIRO**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

APROVADO

Prof. Dr. **EDILBERTO PEREIRA TEIXEIRA**
(Universidade Federal de Uberlândia/UFG)

Aprovado

Prof. Dr. **IVAN NUNES DA SILVA**
(UNESP/Campus de Bauru)

APROVADO

Dr. **FRANCISCO ANTONIO REIS FILHO**
(Escola Politécnica/USP)

APROVADO

Prof. Assoc. **MURILO ARAUJO ROMERO**
Coordenador do Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Elétrica

Profa. Assoc. **MARIA DO CARMO CALIJURI**
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

Ao meu pai,
que sempre estará em meu coração.

AGRADECIMENTOS

À Deus, por todo auxílio que Ele tem dado a mim, minha família e meus amigos e por tornar tudo isto possível.

À minha esposa e meu filho, pela compreensão, apoio e por todas as alegrias que me auxiliam nos momentos mais difíceis.

À minha mãe, meu pai (*in memoriam*) e meus irmãos, pela solidariedade e apoio.

Ao Professor Denis, pelo tempo dispensado, pelos ensinamentos, a paciência, amizade e compreensão que tornaram este trabalho possível.

Aos meus amigos: José Luiz, Ana Célia e Mateus que tanto me auxiliaram e estimularam.

Ao amigo Ênio que tanto me auxiliou em análises e discussões.

Aos professores e funcionários da EESC-USP que contribuíram para conclusão deste trabalho.

Sumário

LISTA DE FIGURAS.....	I
LISTA DE TABELAS.....	III
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	IV
SÍMBOLOS.....	V
RESUMO.....	VII
ABSTRACT.....	IX
1-INTRODUÇÃO.....	1
1.1-Fundamentos da proteção de Sistemas Elétricos de Potência.....	1
1.2-Faltas em transformadores de potência.....	2
1.3-Modelagem de transformadores.....	3
1.3.1-A Lei Circuital de Ampère.....	3
1.3.2-Modelo simplificado do transformador.....	4
1.3.3-Curvas de Histerese.....	5
1.3.4-Corrente de Magnetização.....	7
1.4-A proteção de transformadores.....	10
1.4.1-Definição de relés.....	11
1.4.2-Transformadores de instrumentos	13
1.4.2.1-Transformadores de Corrente (TCs).....	13
1.4.3-O relé diferencial	16
1.4.4-O relé diferencial percentual.....	17
1.4.5-Problemas na detecção de faltas nos transformadores.....	19
1.4.6-O relé digital.....	21
2-REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	27

2.1–Simulações de faltas e energizações em transformadores.....	27
2.2–Aplicações de proteção diferencial de transformadores.....	29
3–FUNDAMENTOS DE WAVELETS.....	33
3.1–Introdução.....	33
3.2–Breve descrição da Análise de Fourier.....	33
3.3–Introdução a Wavelets.....	36
3.4–A Transformada Discreta Wavelet.....	40
4–SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DOS TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA ESTUDADOS.....	43
4.1–Introdução ao programa de simulação computacional ATP.....	43
4.2–Os transformadores de potência analisados.....	45
4.2.1–Diagrama simplificado dos sistemas utilizados.....	45
4.2.1.1 – Primeiro sistema estudado.....	45
4.2.1.2 – Segundo sistema estudado.....	46
4.2.2–O modelo do transformador estudado.....	47
4.2.3–Determinação da corrente diferencial.....	52
4.2.4–Utilização do efeito da saturação dos TCs nas simulações.....	55
4.3–Descrição das simulações realizadas.....	56
4.4–Detalhes do programa de simulação MATLAB®.....	58
5–APLICAÇÃO DE WAVELETS NA PROTEÇÃO DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA.....	59
5.1–Fluxograma de proteção diferencial de transformadores utilizando TDF.....	59
5.2–Fluxograma de proteção diferencial de transformadores utilizando TDW.....	61
5.3–Atuação do relé diferencial percentual.....	63

5.4–Método de discriminação entre falta interna e energização utilizando o método do limiar.....	65
5.5–Simulações do sistema de proteção sem o efeito de saturação de TCs.....	67
5.5.1–Exemplos utilizando a TDW.....	67
5.5.2–Exemplos utilizando a TDF.....	74
5.5.3–Comparação entre os métodos de TDW e TDF.....	76
5.6–Simulações do sistema de proteção com o efeito de saturação de TCs.....	78
5.6.1–Exemplos utilizando a TDF.....	78
5.6.2–Exemplos utilizando a TDW.....	80
5.6.3–Comparação entre os métodos de TDW e TDF.....	83
5.7–Método de discriminação entre falta interna e energização utilizando-se RNAs.....	85
5.7.1–Dados utilizados nas simulações das RNAs.....	86
5.7.2–Parâmetros e características das RNAs empregadas.....	86
5.7.3–Resultados obtidos com o emprego de RNAs	88
6–CONCLUSÕES.....	90
ANEXO A.....	93
ANEXO B.....	98
B1–Fundamentos biológicos básicos e introdução as RNAs	98
B2–Redes Neurais Artificiais e o reconhecimento de padrões.....	101
B3–Modelos de Redes Neurais Artificiais de Multicamadas.....	102
B4–O método de "Back–propagation".....	104
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	109
APÊNDICE I.....	114

APÊNDICE II.....	118
APÊNDICE III.....	122
APÊNDICE IV.....	127
APÊNDICE V.....	129

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 01–Modelo simplificado de um transformador monofásico.....	5
FIGURA 02–Curvas características de Histerese.....	6
FIGURA 03–Corrente diferencial do transformador durante a energização.....	9
FIGURA 04–Desligamento e religação na presença do mesmo fluxo residual.....	10
FIGURA 05–Ligação de TCs –Y (esquerda) e Δ (direita).....	15
FIGURA 06–Esquema fundamental da proteção diferencial.....	16
FIGURA 07–Relé diferencial percentual.....	18
FIGURA 08–Curva característica da proteção diferencial percentual.....	18
FIGURA 09–Esquema de um relé digital.....	23
FIGURA 10–Exemplo de uma Transformada de Fourier (e) e uma STFT (d).....	36
FIGURA 11–Mudança de dilatações e translações de uma Wavelet.....	37
FIGURA 12–Exemplo de uma Wavelet Morlet.....	38
FIGURA 13–Detalhes da decomposição de uma TDW.....	41
FIGURA 14 – Sistema elétrico estudado.....	45
FIGURA 15–Circuito do transformador em detalhes.....	47
FIGURA 16–Curva de saturação fluxo–corrente do Transformador 1.....	49
FIGURA 17–Curva de saturação fluxo–corrente do Transformador 2.....	50
FIGURA 18–Simulação da situação de falta interna no transformador.....	51
FIGURA 19–Exemplo de simulações no ATP de falta interna.....	54
FIGURA 20–Exemplo de simulações no ATP de energização a vazio.....	54
FIGURA 21–Curva de saturação do TC utilizado no primeiro sistema.....	55
FIGURA 22–Curva de saturação do TC utilizado no segundo sistema.....	55
FIGURA 23–Fluxograma do dispositivo de proteção diferencial utilizando TDF...	60
FIGURA 24–Fluxograma do dispositivo de proteção diferencial utilizando TDW.	62

FIGURA 25–Exemplo de restrição do relé percentual.....	64
FIGURA 26–Exemplo de atuação do relé percentual.....	64
FIGURA 27–Função Daubechies 4, escala (e) e função (d).....	65
FIGURA 28 –Análise da TDW para um caso de energização.....	69
FIGURA 29 –Análise da TDW para o caso de uma falta interna.....	69
FIGURA 30 –TDW –IdifA de um ciclo, energização a vazio (Transformador 2)...	71
FIGURA 31–TDW–IdifA de meio ciclo, energização a vazio (Transformador 2)...	72
FIGURA 32–TDW–IdifA de um ciclo, de uma falta interna (Transformador 2)....	73
FIGURA 33–TDW–IdifA de meio ciclo, falta interna (Transformador 2).....	74
FIGURA 34 –TDF, energização a vazio (Transformador 1).....	75
FIGURA 35–TDF–IdifA de um ciclo, falta interna (Transformador 1).....	76
FIGURA 36–TDF da Idifa,energização a vazio (Transformador 1).....	79
FIGURA 37–TDF da Idifa, falta entre as espiras–fase A (Transformador 1).....	79
FIGURA 38–TDW–IdifB de um ciclo, energização a vazio (Transformador 1).....	80
FIGURA 39–TDW–IdifA de um ciclo, falta interna (Transformador 1).....	81
FIGURA 40–TDW–IdifA de meio ciclo, energização a vazio (Transformador 2)...	82
FIGURA 41–TDW–IdifA de meio ciclo falta interna (Transformador 2).....	82
FIGURA 42 – Arquitetura padrão da RNA utilizada.....	87
FIGURA 43 – Treinamento de uma RNA para dados dos dois sistemas.....	88
FIGURA A1 – Arquitetura de uma Rede Neural Artificial.....	102

LISTA DE TABELAS

Tabela 1–Curva de saturação do Transformador 1.....	48
Tabela 2–Divisão do enrolamento primário em 4 seccionamentos.....	52
Tabela 3–Simulações executadas para os dois sistemas.....	56
Tabela 4–Janela de dados utilizados pela TDW.....	67
Tabela 5–Resultados dos diagnósticos de TDW e TDF sem a presença do efeito de saturação dos TCs.....	77
Tabela 6–Resultados dos diagnósticos de TDW e TDF com a presença do efeito de saturação dos TCs.....	83
Tabela 7–Número de casos empregados nas RNAs.....	87
Tabela 8–Melhores resultados obtidos com as RNAs utilizadas.....	89
Tabela A1–Diagnósticos utilizando a TDF.....	93
Tabela A2–Diagnósticos utilizando a TDW no Transformador 1 sem a presença do efeito de saturação dos TCs.....	94
Tabela A3–Diagnósticos utilizando a TDW no Transformador 2 sem a presença do efeito de saturação dos TCs.....	95
Tabela A4–Diagnósticos utilizando a TDW no Transformador 1 com a presença do efeito de saturação dos TCs.....	96
Tabela A5–Diagnósticos utilizando a TDW no Transformador 2 com a presença do efeito de saturação dos TCs.....	97

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A/D	– <i>Analógico / Digital</i>
ABNT	– <i>Associação Brasileira de Normas Técnicas</i>
ANSI	– <i>American National Standards Institute</i>
ATP	– <i>Alternative Transient Program</i>
CA	– <i>Corrente Alternada</i>
CC	– <i>Corrente Contínua</i>
CPFL	– <i>Companhia Paulista de Força e Luz</i>
D/A	– <i>Digital / Analógico</i>
TDF	– <i>Transformada Discreta de Fourier</i>
EMTP	– <i>Electromagnetic Transient Program</i>
FCEM	– <i>Força Contra Eletromotriz</i>
FFT	– <i>Fast Fourier Transform</i> (Transformada Rápida de Fourier)
f.p.	– <i>Fator de Potência</i>
NA	– Normalmente Aberto (contato)
NBR	– Norma Brasileira Registrada
N/D	– Não Disponível
NF	– Normalmente Fechado (contato)
RNA	– Rede Neural Artificial
rms	– <i>root mean square</i> (média quadrática)
SEP	– Sistema Elétrico de Potência
STFT	– <i>Short Time Fourier Transform</i>
TC	– Transformador de Corrente
TDF	– <i>Transformada Discreta de Fourier</i>
TDW	– <i>Transformada Discreta Wavelet</i>

SÍMBOLOS

ϕ	– Fluxo magnético
B	– Densidade de fluxo
E_1	– Tensão no primário do transformador ideal
E_2	– Tensão no secundário do transformador ideal
f	– Frequência(Hertz)
H	– Intensidade de campo magnético
i ou I	– Corrente elétrica
I_1	– Corrente no primário do transformador
I_2	– Corrente no secundário do transformador
I_m	– Corrente de magnetização do transformador
I_{base}	– Corrente de base
K	– Relação entre as espiras do secundário e do primário (N_2/N_1)
l	– Comprimento
L	– Indutância
L_+	– Indutância de seqüência positiva
L_0	– Indutância de seqüência zero
N_1	– Número de espiras do primário do transformador
N_2	– Número de espiras do secundário do transformador
θ	– Ângulo de fase da impedância
R	– Resistência
R_+	– Resistência de seqüência positiva
R_0	– Resistência de seqüência zero
S	– Área

S_{base}	– Potência de base
V_{base}	– Tensão de base
V_1	– Tensão no primário do transformador
V_2	– Tensão no secundário do transformador
ω	– Frequência (radianos)
X	– Reatância indutiva
Z	– Impedância

RESUMO

JORGE, D. C. (2003). *Transformadas Wavelet Aplicadas à Proteção Diferencial de Transformadores de Potência*, 129 p. – Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Transformadores de potência são dispositivos que requerem atenção especial devido a sua grande importância ao Sistema Elétrico de Potência no qual ele está conectado. Geralmente relés diferenciais são utilizados como proteção primária em transformadores de potência. Nestes relés, a corrente diferencial é comparada com um nível de ajuste e caso ocorra uma falta interna, o transformador deverá ser desconectado do restante do sistema. Entretanto, a simples detecção da presença de uma corrente diferencial não é suficiente para distinguir faltas internas de outras situações que também podem produzir tal corrente. Tais situações surgem durante a energização dos transformadores, devido a saturação dos transformadores de corrente, entre outras, as quais podem resultar em uma incorreta atuação da proteção. Uma rápida e correta discriminação entre faltas internas e outras situações é um dos desafios da moderna proteção de transformadores de potência. A respeito da identificação de faltas internas ou situações de energização, além da mencionada lógica diferencial é acrescentado uma subrotina baseada na restrição de harmônicas. Neste método, a corrente de energização é reconhecida através da presença de uma 2ª harmônica obtida por filtros de Fourier. No entanto, o método de filtragem pode algumas vezes retardar a operação da proteção. Além disto, uma componente de 2ª harmônica pode também estar presente durante uma falta interna.

Este trabalho propõe a utilização da Transformada Wavelet – uma poderosa

ferramenta matemática – empregada como um meio rápido e eficiente de analisar as formas de onda de transformadores de potência e como uma alternativa a tradicional Transformada de Fourier. Os sinais das correntes diferenciais são processados pelas Transformadas Discretas Wavelet, visando obter uma discriminação entre ambas situações (energização e falta). Um nível de limiar é utilizado após a decomposição *Wavelet* do sinal para discriminar entre as situações descritas. A janela de dados utilizada para este propósito pode ser variada. Para testar o algoritmo proposto, as simulações de energização e falta foram implementadas, utilizando o programa ATP ("*Alternative Transient Program*"). Em situações onde a janela de dados é reduzida para $\frac{1}{4}$ de ciclo o critério de discriminação pode ser otimizado utilizando a Transformada Discreta de Wavelet auxiliada com técnicas de reconhecimento de padrões. Este trabalho apresenta a utilização de Redes Neurais Artificiais para tal finalidade como exemplo. Resultados encorajadores são apresentados sobre a capacidade de discriminação para as situações descritas assim como a rapidez de resposta quando comparados aos métodos tradicionais.

Palavras-chave: proteção de transformadores, *Wavelet*, corrente de energização, falta, relé diferencial.

ABSTRACT

JORGE, D. C. (2003). *Wavelet Transform Applied to Differential Protection in Power Transformers*, 129 p. – Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Power transformers are devices that require special maintenance and care due to their importance to the electrical system to which they are connected. Generally, differential relays are used for the primary protection of large transformers. In such relays, differential currents are compared to a threshold and in the case of an internal fault, the transformer should be disconnected from the rest of the system. However, a simple detection of a differential current is not sufficient to distinguish internal faults from other situations that also produce such a current. Some of these situations appear during transformer energization (inrush currents), CT (current transformer) saturation, among others, which can result in an incorrect trip. A correct and fast distinction of internal faults from the other situations mentioned is one of the challenges for modern protection of power transformers. Concerning the identification of internal faults as opposed to inrush currents, the approach traditionally used is the aforementioned differential logic together with harmonic restraint. In this method, transformer inrush current due to energization is recognized on the basis of second harmonic components obtained by Fourier filters. However, the filtering method can sometimes delay the protection process. In addition to this, a second harmonic component can also be present during internal faults.

This work proposes Wavelet Transform— a powerful mathematical tool — employed as a fast and effective means of analyzing waveforms from power

transformers, as an alternative to the traditional Fourier Transform. The differential signals are processed by Discrete Wavelet Transform to obtain the discrimination between both situations (inrush and fault). A threshold level is utilized after the Wavelet decomposition to discriminate the situations described. The time window used for such purpose can be varied. In order to test the proposed algorithm, simulations of fault and inrush currents in a power transformer were implemented using ATP ("Alternative Transient Program") software. When the time window is reduced to only $\frac{1}{4}$ of the de cycle the discrimination criteria should be optimized using a pattern recognition technique to aid the Discrete Wavelet Transform. This study shows as a sample for this purpose the use of Artificial Neural Networks. Very encouraging results are presented concerning the capacity of discrimination of the described situations as well as the speed of response when compared to the traditional method.

Keywords: transformer protection, *Wavelet*, inrush current, fault, differential relay.

1-INTRODUÇÃO

1.1-Fundamentos da proteção de Sistemas Elétricos de Potência

Para garantir a qualidade da produção de energia elétrica e a continuidade de seu fornecimento ao consumidor são necessários diversos cuidados, entre eles a proteção adequada do Sistema Elétrico de Potência (SEP).

A proteção de um SEP possui diversos itens a serem ponderados. Três aspectos relevantes podem ser citados [1]:

- a) Não interferência durante a operação normal do sistema.
- b) Desenvolvimento de um projeto visando a prevenção eficiente contra falhas elétricas.
- c) Limitação da sua atuação a menor área do sistema elétrico possível, durante a ocorrência de uma falta.

Faltas em um SEP não podem ser previstas e ocorrem de maneira aleatória. Diversos fatores podem levar um SEP a uma situação de falta, tais como: descargas atmosféricas, falhas de isolamento, contato com elementos estranhos ao sistema (animais, galhos, etc.) envolvendo equipamentos ou condutores, manobras realizadas em equipamentos, entre outros. Se o componente faltoso (Linha de Transmissão (LT), barramento, transformador, etc.) não for isolado rapidamente do sistema, este poderá conduzir o SEP para sua instabilidade ou para a atuação automática dos demais sistemas de proteção (situação conhecida como "efeito cascata"). A

persistência da falta pode ainda causar danos a equipamentos próximos ao elemento faltoso, devido aos elevados valores de correntes, as correntes desequilibradas ou ainda baixas tensões produzidas pela falta.[2]

1.2-Faltas em transformadores de potência

Os transformadores de potência presentes no SEP estão entre os componentes que necessitam de uma atenção especial, devido a sua importância, complexidade e alto custo.

O projeto e manutenção de transformadores atingiram um excelente nível técnico atualmente, tornando os mesmos equipamentos de alta confiabilidade nos SEPs. A existência de aplicativos computacionais foi primordial para alcançar tal posição. Na atualidade, são possíveis simulações e diagnósticos detalhados de fluxos magnéticos presentes nos transformadores, transitórios elétricos, qualidade do óleo, entre outros itens.

Os transformadores, no entanto, são elementos sujeitos à faltas como qualquer outro equipamento. Estas faltas podem ser de extrema gravidade para o SEP. A substituição de equipamentos em caso de faltas que os danifiquem não pode ser realizada com rapidez, quando envolvem transformadores de grande porte (acima de 500kVA), sendo a ausência deste equipamento, algumas vezes, desastrosa para a operação do SEP como um todo. A atual falta de energia que ocorre em nível mundial, devido ao elevado consumo que não é acompanhado por uma adequada expansão dos SEPs, agravaram ainda mais as eventuais faltas em transformadores. Eventualmente, as faltas em transformadores podem levar todo um SEP a instabilidade, uma vez que os transformadores se encontram, atualmente, operando

em uma margem de operação muito próxima de seus limites.

As faltas em transformadores podem ser curto-circuitos nos enrolamentos, sobreaquecimento e circuitos abertos. Os problemas envolvendo circuitos abertos não são danosos, e ocorrem raramente. Existe uma proteção térmica para situações de sobreaquecimento que, geralmente, acionam alarmes e bancos de ventiladores e, apenas em casos extremos, ocasionam o desligamento do equipamento. Os curto-circuitos internos e uma eficiente proteção de retaguarda contra faltas externas merecem, entre os itens citados, especial atenção na proteção de transformadores.[1]

Os curto-circuitos internos podem ocorrer por inúmeros motivos, entre eles:

- Aquecimento excessivo dos enrolamentos do transformador, causando a perda da isolamento dos condutores do transformador.

- Presença de impurezas ou acidez do óleo do transformador.

- Sobretensões devido a descargas atmosféricas ou manobras.

Todos estes fatores podem ocasionar a falta, ou podem colaborar para o desgaste precoce dos condutores e seu isolamento, ocasionando, inevitavelmente, um curto entre as espiras ou entre as fases.

1.3-Modelagem de transformadores

1.3.1-A Lei Circuitual de Ampère

Adaptada à situação de um transformador, pode-se utilizar a Lei Circuitual de Ampère¹, que pode ser derivada da Lei de Biot-Savart [4], que estabelece uma

¹ Biot, Savart e Ampère eram colegas e professores de física no Colégio de França, na mesma época.

relação entre a corrente elétrica e a intensidade de campo magnético, apresentada a seguir:

$$\oint_l H \cdot dl = n \cdot i \quad (1.1)$$

onde:

$H \rightarrow$ intensidade de fluxo magnético

$l \rightarrow$ comprimento

$n \rightarrow$ número de espiras

$i \rightarrow$ corrente elétrica

A Lei Circuital de Ampère estabelece uma relação entre a intensidade de fluxo magnético e a corrente elétrica. Pode-se, no entanto, estabelecer uma relação entre a corrente elétrica e o fluxo magnético, uma vez que:[5]

$$B = \mu \cdot H \quad (1.2)$$

onde:

$B \rightarrow$ densidade de fluxo magnético

$\mu \rightarrow$ permeabilidade magnética

$H \rightarrow$ intensidade de fluxo magnético

porém: $B = \frac{\phi}{S}$ onde:

$\phi \rightarrow$ fluxo magnético

$S \rightarrow$ área

1.3.2–Modelo simplificado do transformador

A Figura 01, apresentada a seguir, apresenta o modelo simplificado de um transformador monofásico. A impedância de acoplamento magnético é representada no lado primário; a resistência R_m representa as perdas por histerese e corrente de Foucault e a reatância indutiva X_m é a responsável pela corrente de magnetização, uma parcela da corrente de excitação do transformador. [3]

FIGURA 01—Modelo simplificado de um transformador monofásico

Uma vez que há uma relação entre a corrente elétrica e a intensidade de fluxo magnético (eq. (1.1)), é possível estabelecer uma relação entre a corrente de magnetização que percorre a indutância X_m e o fluxo magnético (ϕ), sendo, portanto, possível solucionar o modelo apresentado ou mesmo incluí-lo em simulações de circuitos que possuam a presença de transformadores.

1.3.3—Curvas de Histerese

O núcleo da grande maioria dos transformadores elétricos é constituído de material ferromagnético. Os materiais ferromagnéticos não apresentam uma relação linear $B \times H$ ou $\phi \times I_m$, como apresentado na eq. (1.2). A relação entre a corrente elétrica que percorre os enrolamentos de um transformador de potência e o fluxo magnético, é conhecida como curva de magnetização, curva de saturação ou curva de Histerese, disponibilizada pelo fornecedor do material. A relação entre os laços da curva de Histerese dependem do valor da tensão fornecida ao transformador. A Figura 02 apresenta uma série de curvas de Histerese características, sendo possível

observar na curva mais externa a existência de uma região onde ocorre a saturação (ϕ_s) do fluxo magnético, onde independentemente da corrente inserida, o fluxo magnético permanecerá inalterado. Esta característica (conhecida por saturação) causa um dos mais sérios erros durante a utilização de transformadores. A saturação impede o transformador de manter sua relação entre as tensões e correntes em seus terminais. A existência de um residual magnético (ϕ_r), independentemente da presença de corrente elétrica, também pode ser notado. Apenas a elevação da temperatura do núcleo do transformador acima do ponto definido como ponto de Curie pode remover a presença deste residual magnético de forma eficiente.

FIGURA 02—Curvas características de Histerese

O projeto dos transformadores é realizado considerando sua operação apenas na região onde há linearidade em sua curva de Histerese, ocorrendo sempre anteriormente ao ponto de saturação, onde os mesmos se comportam como elementos lineares. A inclinação $\phi \times I_m$ tem dimensão de uma indutância linear e é conhecida como indutância de magnetização. Em regime permanente, o valor da

corrente de magnetização em transformadores de potência se encontra entre 0,1–0,5% da corrente nominal.[3]

1.3.4–Corrente de Magnetização

Quando o transformador opera na região superior ao limiar do ponto de saturação, a corrente de excitação se eleva rapidamente, podendo ultrapassar a corrente nominal. Nestas condições parte dos enlaces de fluxo se processam pelo ar, sendo estas denominadas reatâncias de núcleo de ar as relações $\phi \times I_m$, onde pequenas variações de fluxo provocam grandes variações da corrente de magnetização. A operação nesta região é usual apenas quando ocorrem transitórios do sistema, comumente a energização com secundário a vazio ou eliminação de defeitos. Nestas situações, a corrente presente nos enrolamentos primários é a corrente de excitação transitória, também conhecida como "corrente de magnetização", determinada inicialmente por *Fleming* em 1892 [3]. Tal fato pode ser constatado ao se utilizar a lei de Kirchhoff na Figura 01 e pela eq. (1.3).

$$V_1 = R_1 \cdot I_1 + L_1 \cdot \frac{dI_1}{dt} + N_1 \cdot \frac{d\phi}{dt} \quad (1.3)$$

onde:

$R_1 \cdot I_1$ é a queda de tensão na resistência do primário

$L_1 \cdot \frac{dI_1}{dt}$ é a queda de tensão devido ao fluxo de dispersão do enrolamento primário

$N_1 \cdot \frac{d\phi}{dt}$ é a fem induzida no primário

A solução desta equação diferencial deve ser determinada com a utilização da curva

de histerese, sendo necessárias aproximações. A solução é composta por uma solução particular e uma solução complementar. A primeira representa o regime permanente e a segunda, o transitório.[6]

Considerando a eq. (1.3) que os dois primeiros termos podem ser desprezados e supondo que no momento da energização a tensão se encontre em um ponto $V_{lm} \cdot \sin \alpha$, em que α é um ângulo qualquer cujo propósito é definir o valor da tensão da fonte no instante $t=0$, tem-se:[6]

$$V_1 = V_{lm} \cdot \sin(\omega \cdot t + \alpha) = N_1 \cdot \frac{d\phi}{dt} \quad (1.4)$$

$$\int V_1 dt \rightarrow \phi = \phi_0 + \phi_m \cdot \cos \alpha - \phi_m \cdot \cos(\omega \cdot t + \alpha)$$

onde:

$$\phi_0 \rightarrow \text{fluxo residual no instante } t=0 \quad e \quad \phi_m = \frac{V_{lm}}{N_1 \cdot \omega}$$

É interessante notar que o termo $(\phi_0 + \phi_m \cdot \cos \alpha)$ para os casos reais apresentará amortecimento. Assim, após encerrado o transitório da energização, o fluxo no núcleo será dado apenas pela parcela $\phi_m \cdot \cos(\omega \cdot t + \alpha)$. [6]

A Figura 03, apresenta um exemplo de corrente de magnetização em um transformador, obtida no sinal de corrente da fase A do lado de baixa tensão (BT) de um transformador abaixador. Pode-se observar que os valores atingidos são extremamente elevados. Há também de se notar uma considerável presença de uma 2ª harmônica.

FIGURA 03–Corrente diferencial do transformador durante a energização

A corrente de magnetização atinge picos elevados apenas durante os primeiros ciclos após a energização. À medida que o tempo passa, os picos decrescem em amplitude até atingirem seu valor em regime permanente. Este transiente tem uma longa duração dependendo da potência nominal do transformador, podendo durar até mesmo alguns segundos.[3]

O comportamento da curva da corrente de magnetização depende do ponto na onda de tensão onde se deu o início da energização, do residual magnético (magnitude e polaridade), da saturação do núcleo e da impedância do sistema.[3]

Uma possibilidade de eliminar o efeito de um residual magnético seria a energização do transformador no ponto exato onde ocorreu seu desligamento, situação indicada na Figura 04. Ocorreria neste caso uma suave operação, considerando a ocorrência do mesmo fluxo magnético.[3]

A pior situação possível ocorre quando o transformador é energizado com a

tensão, passando por zero e seu fluxo magnético residual se encontra em seu máximo negativo. Neste instante, o fluxo poderia atingir até três vezes o valor do fluxo nominal máximo.[3]

FIGURA 04–Desligamento e religação na presença do mesmo fluxo residual

Atualmente os transformadores fabricados buscam um equilíbrio entre um fluxo magnético residual baixo e uma saturação mais elevada, mas estas situações são antagônicas, tornando a construção destes dispositivos de forma a solucionar definitivamente este problema impossível até o presente momento. A presença da corrente de magnetização é, portanto, inevitável e equívocos quanto a sua ocorrência e uma situação de falta interna ainda ocorrem com frequência, mesmo em modernos equipamentos de proteção. A discriminação entre corrente de magnetização e falta interna é um grande desafio para os projetistas dos SEPs e é abordado neste trabalho.

1.4–A proteção de transformadores

A proteção de transformadores de potência é realizada utilizando diversos equipamentos, entre eles:[1][7]

–Válvulas de alívio de pressão: após a ocorrência de descargas internas ou curto-circuitos, o óleo, que atua como elemento isolante e refrigerante no transformador, pode evaporar em pequenas quantidades e causar sobrepressão no tanque do transformador. Válvulas podem ser instaladas, cujas molas atuam vedando o transformador quando a pressão interna se encontra abaixo da pressão de abertura e abrindo para aliviar a pressão, caso esta atinja o valor de abertura das mesmas.

–Proteção de temperatura: informa a temperatura do óleo ou do enrolamento, podem ser programadas para acionar ventiladores auxiliares (presentes nas aletas de refrigeração), bombas de circulação forçada do óleo ou dar sinais de alarme.

–Proteção contra falta de óleo em transformadores: vazamentos nas juntas dos transformadores ou em válvulas, ou mesmo devido a situações mais sérias causam falta de óleo no transformador. Indicadores magnéticos são comuns em transformadores de grande porte atuando como indicadores do nível de óleo dos mesmos.

–Pára-raios: incluídos entre as Linhas de Transmissão (LTs) e os transformadores, entre outras.

Porém, além das proteções citadas, as que se utilizam de relés de proteção estão entre as mais importantes e atuantes.

1.4.1-Definição de relés

A ABNT define o relé como “um dispositivo por meio do qual um equipamento elétrico é operado quando se produzem variações nas condições deste equipamento ou do circuito em que ele está ligado, ou em outro equipamento ou circuito associado.” Em outras normas, o relé é definido como um dispositivo cuja

função é detectar nas linhas ou equipamentos sob situações de falta, perigosas ou indesejáveis condições do sistema, dando início a manobras convenientes de chaveamento ou de avisos.[1]

Um relé pode ser classificado sob diversos aspectos[1]:

- Quanto as grandezas físicas responsáveis por sua atuação*: elétricas, ópticas, térmicas, etc.;
- quanto à natureza da grandeza a que respondem*: tensão, corrente, potência, pressão, temperatura, etc.;
- quanto ao tipo construtivo*: eletromecânicos, digitais, estáticos (efeito Hall), etc.;
- quanto a função*: sobre e subcorrente, tensão, diferencial, etc.;
- quanto a forma de conexão do elemento sensor*: direto no circuito ou através de redutores de medida;
- quanto ao tipo de fonte para atuação do elemento de controle*: CA ou CC;
- quanto ao grau de importância no circuito*: principal ou intermediário;
- quanto ao posicionamento dos contatos (com circuito desenergizados)*: NA ou NF;
- quanto à aplicação*: máquinas rotativas (gerador) ou estáticas (transformadores), linhas áreas ou subterrâneas, etc.;
- quanto a temporização*: instantâneo e temporizado.

Um relé deve possuir qualidades particulares visando otimizar sua atuação no sistema, entre elas cabe citar[1]:

- Simplicidade e robustez em sua construção.
- Ser o mais rápido possível na detecção e atuação .
- Possuir sensibilidade e poder de discriminação.
- Possuir baixo consumo próprio.
- Manter sua regulação independente das intempéries.

- Apresentar baixo custo.
- Possibilitar diagnóstico para atestar sua eficiência e possibilitar sua manutenção sem interromper o fornecimento de energia.

1.4.2–Transformadores de instrumentos

A utilização de valores elevados de tensão e corrente em SEPs torna inviável o envio de valores desta ordem de grandeza aos equipamentos de medição e proteção. A utilização de transformadores de corrente (TC) e tensão (TP) se faz necessária. Entre as vantagens da utilização destes elementos citam-se:[7]

- Alimentar o sistema de proteção e medição com tensão e corrente reduzidas, mas proporcionais às grandezas dos circuitos de potência;
- proporcionar isolamento entre os circuitos de alta tensão e os instrumentos;
- padronizar o nível de tensão e corrente fornecidas, possibilitando a padronização dos equipamentos de medição e proteção.

1.4.2.1–Transformadores de Corrente (TCs)

O enrolamento de um TC é constituído de poucas espiras (2 ou 3, podendo inclusive se limitar ao condutor que está sendo medido) no lado de AT e muitas espiras no lado de BT. Devido a diversos fatores (características construtivas, valor das cargas anexadas a seu lado de BT, entre outros) a relação de transformação não é exata, porém a ABNT e a ANSI estabelecem ensaios para determinar sua aplicação. São suas principais características:

- a) *Corrente nominal e relação nominal*: a corrente de saída na BT do TC deve ser de 5A, segundo a ABNT, de forma semelhante a norma ANSI.
- b) *Classe de tensão de isolamento nominal*: determina a máxima tensão do circuito ao qual o TC será conectado.
- c) *Frequência nominal*: frequência a qual será submetido o equipamento².
- d) *Classe de Exatidão*: corresponde ao máximo erro de transformação, respeitada a carga permitida.
- e) *Carga nominal*: deve-se conhecer a carga que o TC irá suprir; quanto menor for a impedância que será conectada ao secundário do TC maior será a precisão de transferência de informação[7].
- f) *Fator de sobrecorrente nominal*: expressa a relação entre a máxima corrente na qual o TC mantém sua classe de exatidão.
- g) *Fator térmico nominal*: é o fator pelo qual deve ser multiplicada a corrente no lado de AT, para que o TC opere sem exceder os limites de temperatura para sua classe de isolamento. Definido como a relação entre a máxima corrente primária admissível em regime permanente e a sua corrente nominal, os valores usuais se encontram entre 1,5 e 2,0.[8]
- h) *Limite de corrente de duração para efeito térmico*: é o valor da corrente primária simétrica que o TC pode suportar por um determinado tempo (1 segundo normalmente).
- i) *Limite de corrente de curta duração para efeito mecânico*: é o maior valor eficaz de corrente que o TC deve suportar sem se danificar mecanicamente.

O efeito da saturação deve ser evitado para se obter um correto diagnóstico de falta dos relés, porém, como explicitado anteriormente, este é o responsável por

² 60Hz no Brasil

um dos maiores erros que ocorrem em transformadores. Pode-se, no entanto, recorrer a um *gap* de ar, visando linearizar o comportamento da curva de histerese e eliminar a saturação. Porém, tal medida deve ser tomada com cautela, pois o transformador poderá operar de forma ineficiente com este recurso, uma vez que a utilização de um *gap* de ar irá aumentar, consideravelmente, a relutância do núcleo do transformador. Quanto menor for a relutância, menor a força magnetomotriz de magnetização requerida para circular o fluxo necessário. Transformadores de alta precisão devem ser construídos sem juntas ou emendas, utilizando chapas de aço-silício específicas para tal aplicação[7].

Os TCs são ligados em série com o circuito de potência e suas ligações mais comuns são apresentadas na Figura 05.

FIGURA 05–Ligação de TCs –Y (esquerda) e Δ (direita)

Na construção dos transformadores, suas fases são construídas de modo a obter as *f.e.m.* (força eletromotrizes) atuantes nas fases de cada coluna com o mesmo sentido, assim como a ordem de alocação das fases é estabelecida seguindo padrões. Estas atuações têm como conseqüências, quando utilizadas ligações Δ -Y ou Y- Δ , o

surgimento de um deslocamento angular de 30° entre as correntes[10][11]. Uma maneira de se corrigir tal deslocamento angular é instalar os transformadores de corrente (TCs) de maneira inversa às ligações dos lados do transformador. Então, por exemplo, a ligação de um transformador Δ -Y deverá possuir ligação Y- Δ para o TC.[12]

1.4.3–O relé diferencial

Por definição, um relé diferencial é aquele que opera quando o valor da diferença entre duas ou mais grandezas elétricas semelhantes excede uma quantidade pre-determinada.[7]

Pode-se proteger um elemento como indicado na Figura 06, onde a passagem do fluxo de corrente em um elemento protegido é monitorada. O Elemento Protegido estará operando de forma correta quando a corrente que entra neste elemento e a corrente que sai do mesmo mantém uma relação constante, por exemplo $|I_a| \approx k \cdot |I_b|$ ($k \in \mathbb{R}$). Caso ocorra uma falta interna ao elemento, este equilíbrio não mais ocorrerá e será possível observar a ocorrência de uma falta interna.

FIGURA 06–Esquema fundamental da proteção diferencial

A proteção diferencial é utilizada em diversos equipamentos do sistema, tais como: geradores, linhas, barras e transformadores. Os transformadores apresentam algumas dificuldades para serem protegidos por um esquema diferencial, tais como a compensação das ligações dos TCs, já abordada no item anterior, bem como problemas com a corrente de magnetização.

1.4.4—O relé diferencial percentual

Existem dois esquemas fundamentais de relés que empregam a técnica de proteção diferencial: o *relé diferencial amperimétrico* e o *relé diferencial percentual*. Este estudo utiliza o *relé diferencial percentual* devido ao melhor desempenho apresentado por este elemento de proteção.

O *relé diferencial amperimétrico* é um dispositivo que monitora as correntes de entrada e saída em um dispositivo, como indicado na Figura 06, conectado de forma a obter o vetor da diferença entre sinais de mesma grandeza.

O *relé diferencial percentual* possui uma atuação semelhante ao *relé diferencial amperimétrico*, porém há uma bobina de restrição presente em cada uma das metades da bobina do relé, conforme mostra a Figura 07. Nota-se que a presença destas bobinas irá possibilitar o ajuste do relé a diversas situações, sendo a curva de atuação do relé, anteriormente fixa, sujeita a uma maior flexibilidade.

A atuação deste relé é mais precisa, sendo possível observar tal fato. Caso ocorra uma falta externa ao transformador ou uma sobrecarga, haveria uma circulação de corrente igual nas duas bobinas de restrição, fazendo com que a corrente na bobina do relé seja igual a zero, sendo então necessária uma elevada corrente de operação para atuação do relé. Caso ocorra uma falta interna, haveria

uma inversão em uma das correntes: tome-se a corrente I_2 como exemplo, a corrente que circularia na bobina de restrição seria dada por $|I_1 - I_2|/2$. Neste caso ocorreria a soma das correntes na bobina do relé, conseqüentemente sua operação.

FIGURA 07-Relé diferencial percentual

O ajuste do *relé diferencial percentual* é mais flexível que o utilizado pelo *relé diferencial* convencional. É possível, além de ajustar a corrente diferencial limite, ajustar também o ângulo da curva que compõe a região de atuação (ajuste percentual)[1], otimizando a região de atuação do equipamento. Tal ajuste pode ser observado na Figura 08.

FIGURA 08-Curva característica da proteção diferencial percentual

1.4.5-Problemas na detecção de faltas nos transformadores

Como explicitado anteriormente, a proteção diferencial aplicada a transformadores de potência enfrenta problemas adicionais. Alguns fatores contribuem para a incorreta operação destes dispositivos, entre eles:

- Mudança de TAPs automática.
- Residual magnético dos transformadores.
- Sobreexcitação dos transformadores.
- Saturação dos TCs.
- Corrente de magnetização (“inrush”).
- Rejeição de carga.

A ação de mudança automática da relação de transformação é uma ocorrência comum na atualidade. Os dispositivos conhecidos como TAPs do transformador mudam a relação de transformação, visando atender a relação de transformação almejada. Esta atitude é necessária haja visto a possibilidade de variação do fluxo de potência ao longo do tempo de operação da unidade transformadora. Esta mudança, porém, pode ser acompanhada, ou sinalizada para o equipamento da proteção diferencial, bastando para tal a conexão correta entre o dispositivo de mudança do TAP e o sistema de proteção.

A sobreexcitação ou retentividade magnética dos transformadores são aspectos que influem na operação da proteção de modo mais discreto, uma vez que os mesmos devem ser conhecidos ou estimados razoavelmente durante o projeto da proteção. O residual magnético pode ocorrer quando o transformador for desligado, sendo ele religado quando ainda não foi atingida a ausência total de fluxo magnético interno. A presença de intensos campos magnéticos internos, devido a retentividade

magnética do material utilizado na confecção do núcleo do transformador, também pode ocasionar o surgimento de um residual magnético. A ocorrência de residual magnético ocorre aleatoriamente e possui um difícil diagnóstico. A sobreexcitação indica que o transformador está operando além do seu limite, o que incorre em falha grave no sistema, sendo a atuação da proteção não prevista na maioria dos casos, mas providencial para indicar o uso incorreto do transformador para o sistema em que ele se encontra.

A discriminação entre uma situação de energização ou falta interna no transformador é outro problema grave que prejudica a detecção de faltas nos transformadores. A situação de energização é detectada através da presença de uma 2ª harmônica muito intensa no sinal da corrente diferencial, durante a ocorrência de energização. Este é o método empregado na atualidade para prevenir uma incorreta atuação de um relé diferencial que protege um transformador. Apesar do método apresentar resultados satisfatórios, eventualmente algumas situações de faltas internas apresentam também uma 2ª harmônica muito intensa, assim como também ocorrem energizações que não apresentam uma 2ª harmônica tão intensa, causando uma incorreta atuação da proteção. Cabe ainda salientar que, para um diagnóstico correto, é necessário ao menos um ciclo de dados para análise, o que compromete uma resposta rápida do sistema de proteção como um todo.

A aplicação desenvolvida neste trabalho visa a implementação de um sistema de proteção em um transformador de potência trifásico, utilizando as correntes diferenciais das três fases como entrada e a Transformada Discreta Wavelet como discriminante entre situações de falta (interna e externa ao transformador) e energização. A informação é normalizada, visando sua aplicação a qualquer modelo de transformador, tornando desnecessária a calibração do dispositivo.

1.4.6—O relé digital

Com o surgimento dos computadores digitais, no início da década de 60, começaram a existir várias soluções computacionais para os diversos problemas, em todas as áreas de conhecimento. Na Engenharia Elétrica, este foi um período durante o qual os computadores digitais, lenta e sistematicamente, foram substituindo muitas ferramentas de análise de circuitos na área de potência. Inicialmente os problemas de fluxo de carga, estabilidade, curto-circuito, cuja solução foram as primeiras preocupações dos planejadores de SEPs, foram convertidos em programas computacionais. Os relés foram então visualizados como os próximos dispositivos a serem computadorizados. Porém, nesta época, não havia ainda a capacidade técnica dos dispositivos computacionais para possibilitar o desempenho de alta velocidade necessárias aos relés. Também, não ocorreram incentivos econômicos para tais estudos. A evolução dos computadores nos anos posteriores foi tão rápida que os algoritmos sofisticados, demandados pelos programas de proteção utilizados nos relés, finalmente encontraram uma correspondência em velocidade e economia nos modernos microcomputadores, tornando possível a "digitalização" dos relés [9].

Entre os benefícios advindos dos relés digitais, podemos citar [9]:

—*Custo*: Com características equivalentes aos relés convencionais, o custo do relé digital é a principal consideração para sua aceitação. Nos primeiros estágios dos relés digitais, seu custo era entre 10 a 20 vezes maior que o custo de um relé convencional. Nos anos seguintes, o custo do relé digital foi reduzindo, ao mesmo tempo que seu poder computacional aumentou substancialmente. O custo dos relés convencionais aumentou ao longo deste mesmo período, devido inicialmente às modificações em seus projetos para melhorar seu desempenho, mas também por

causa da inflação geral e o volume relativamente pequeno de produção e vendas; dificultando a obtenção de peças de reposição. É estimado que para um mesmo desempenho, o custo de um relé digital sofisticado (incluindo o preço do programa computacional) atualmente deva ser o mesmo que o de um relé convencional.

–*Possibilidade de auto-checagem*: O relé digital pode ser programado para monitorar de forma constante o funcionamento de seu "hardware" e seu programa computacional, detectando então qualquer defeito que possa ocorrer. Pode ser programado também para desligar-se do serviço, sem interromper o SEP, se algum defeito for encontrado em seu funcionamento e enviar uma informação de seu estado ao centro de operações.

–*Integração digital no SEP*: Microcomputadores e tecnologia digital estão se tornando a base da maioria dos sistemas em subestações. Medições, comunicações, telemetria e controle estão sendo digitalizados em todos os SEPs. Os relés digitais aumentaram o desempenho e facilitaram o monitoramento, além de apresentarem maior interação, neste novo sistema.

–*Flexibilidade quanto a função*: Um computador digital pode ser programado para executar diferentes trabalhos ou várias funções. Em um relé, a relação entre os sinais de entrada e a saída dependem destas funções. No entanto, devido a sua natureza computacional o mesmo pode ser programado para realizar funções diferenciadas.

–*Oscilografia e análise de seqüência de eventos*: [7] a habilidade dos sistemas de proteção em armazenar dados de dados monitorados (tensão, corrente, frequência, entre outros) na forma digital, assim como o estado dos demais equipamentos monitorados pelo relé.

FIGURA 09—Esquema de um relé digital

A Figura 09 apresenta um esquema de "hardware" de um relé digital para proteção de transformadores de potência, onde pode-se observar a seguinte seqüência:

1) Os sinais de corrente são fornecidos através de transdutores para sua atenuação inicial.

2) Os sinais de corrente entram em um módulo de "interface" onde serão novamente atenuados, para finalmente atingirem níveis adequados para digitalização.

Usualmente a entrada de conversores analógico/digital (A/D) é restrito a $\pm 10V$.

Assim, a escala do secundário dos transformadores deste módulo deverá ser condicionada para estes valores. Há necessidade de divisores resistivos ou mesmo a presença de transformadores de corrente auxiliares para se obter este nível do sinal.

O sinal de corrente deverá ser transformado em um sinal de tensão, haja visto que os equipamentos digitais operam apenas com sinal de tensão. O módulo de "interface" também é composto de filtros analógicos passa-baixa (passivos ou ativos), visando eliminar o fenômeno denominado sobreposição de espectros ("aliasing"). O problema advindo da sobreposição de espectros também é uma fonte de erros da conversão A/D [9].

3) O módulo de sincronização dos sinais é composto por um ou mais multiplexadores e "sample and hold", dependendo da arquitetura adotada para o relé. Os instantes de amostragem são determinados por um "clock", que devem produzir pulsos em uma taxa fixa. Para cada instante, definido pelo "clock", ocorre uma conversão dos valores instantâneos dos sinais analógicos de entrada em uma forma digital. Como o relé em geral, requer várias entradas, várias conversões são realizadas. O multiplexador faz com que os sinais utilizados na conversão sejam processados por um único conversor A/D.

4) O sinal digital segue para o dispositivo processador, para análise e aplicação da rotina computacional nele contido, operando conforme a finalidade para a qual o relé foi projetado. A atuação ou não da proteção é sinalizada na forma digital, fornecida a um controle que irá atuar, se necessário, na chave do circuito, isolando o elemento defeituoso [9].

A propriedade dos relés digitais de armazenar a informação do SEP, ampliaram as possibilidades de diagnosticar faltas com maior precisão, analisar os sinais em busca de informações após a ocorrência de uma falta, discernir com maior eficiência entre uma situação de falta e transitórios, entre outras inúmeras vantagens. Uma das principais razões de tais eventos é a possibilidade de aplicar técnicas matemáticas de solução de problemas mais complexos. O aumento constante da

velocidade de processamento de dispositivos eletrônicos, aliado a redução de seu custo possibilita, atualmente, o emprego de novas técnicas elaboradas como: *Redes Neurais Artificiais*, *Algoritmos Genéticos*, *Wavelets*, entre outras.

Como descrito anteriormente, o trabalho em questão visa a implementação de um esquema completo de proteção diferencial de transformadores de potência utilizando *Transformada Wavelet* para discriminação entre situações de corrente de magnetização e falta interna.

O trabalho apresentará a seguir, no capítulo 2, uma revisão bibliográfica contendo publicações atuais, envolvendo a proteção diferencial de transformadores, com a utilização de diversas técnicas, entre elas, as Transformadas Wavelet. Posteriormente, no capítulo 3, são apresentados os conceitos introdutórios sobre *Wavelets*, com um breve relato histórico e uma descrição das Transformadas Wavelet. O capítulo 4 descreve, detalhadamente, o modelo dos transformadores utilizados e a forma como foram realizadas as simulações para obtenção de dados utilizados nestes estudos. A aplicação e o método desenvolvido neste estudo para discriminação entre falta interna e energização, assim como a análise dos resultados obtidos, serão apresentados no capítulo 5. Conclusões do trabalho desenvolvido com o método utilizando Transformadas Wavelet e uma análise dos resultados obtidos são apresentados no capítulo 6. São apresentados a seguir dois Anexos: o primeiro com tabelas obtidas com a variação de alguns parâmetros dos métodos em estudo, e o segundo com os conceitos fundamentais de *Redes Neurais Artificiais* utilizada como ferramenta de reconhecimento de padrão para auxiliar a Transformadas Wavelet na discriminação, como será exposto no capítulo 5. As referências bibliográficas utilizadas para realizar este trabalho são apresentadas posteriormente aos Anexos. Ao final se encontram os Apêndices, onde as rotinas utilizadas para

evolução do trabalho são apresentadas, assim como a citação da publicação de artigo apresentando resultados deste trabalho em um congresso.

2-REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A Revisão Bibliográfica é separada em duas partes. A primeira parte analisa publicações sobre técnicas para simulação das situações de energização e faltas internas, envolvendo transformadores de potência. A segunda parte analisa publicações que envolvem aplicações de sistemas de proteção na discriminação de situações de corrente de magnetização ou situações de faltas internas nos transformadores de potência.

2.1-Simulações de faltas e energizações em transformadores

As investigações do fenômeno da corrente de magnetização são temas de diversos estudos. Rajakovic [13] propôs a representação fasorial na forma de harmônicos para apresentar, em uma situação estacionária, o fenômeno da corrente de magnetização em transformadores monofásicos e trifásicos. Esta representação é diferente da observada ao se utilizar dados em tempo real. A observação que as perdas por histerese no ferro e a Corrente Eddy atenuam a corrente de magnetização é uma importante contribuição deste trabalho.

Estudos envolvendo a representação da corrente de magnetização e determinação de seu comportamento sob diferentes cargas foram desenvolvidos por Lin [14][15]. A representação da situação de *magnetização*, utilizando dados em tempo real em um transformador monofásico, é comparada a simulações com um

modelo real. São utilizados diferentes fatores de potência nas cargas do transformador, diferentes ângulos de fase da tensão durante o acionamento, assim como valores diferentes de fluxos remanentes. Os resultados do método que utiliza um circuito equivalente e um algoritmo para obter os dados é muito próximo dos valores obtidos no circuito real. Outra importante contribuição deste trabalho diz respeito a determinação das componentes harmônicas e de CC presentes na corrente de magnetização sob diferentes cargas (resistiva, indutiva, capacitiva, sem carga) assim como sob diferentes remanentes magnéticos.

A criação de diferentes métodos, para solucionar o problema advindo do acionamento indevido da proteção, ao se deparar com uma situação de corrente de magnetização e faltas internas no transformador, são de grande importância no estudo proposto. O correto modelamento do transformador é o primeiro passo a ser tomado para possibilitar representar a situação de falta interna. Bastard [16] propôs uma representação de circuito equivalente para ser utilizado no EMTP, envolvendo a representação matricial dos componentes internos e representações dependentes da geometria do equipamento elétrico envolvido. Neste trabalho são realizados equacionamentos, envolvendo os fluxos magnéticos do transformador devidamente representados em situações onde ocorre uma falta entre os enrolamentos do mesmo. O método para simular o transformador em situações de faltas internas é exposto de forma clara, porém é necessário possuir os dados geométricos e outros parâmetros do transformador para realizar a simulação destas faltas no Sistema Elétrico de Potência utilizando as considerações deste método.

As investigações da ocorrência de falhas na proteção, devido a presença da corrente de magnetização, ocorrem não apenas devido a energização de equipamentos, como observado por Hamel [17], mas devido a qualquer flutuação no

circuito que venha ocasionar o surgimento da corrente de magnetização. Hamel apresenta estudos envolvendo a atuação indevida de fusíveis de média tensão (elo fusível) durante a ocorrência de descargas de longa duração em Linhas de Distribuição. A atuação ocorre quando o transformador se encontra protegido por um pára-raios de linha, de ZnO (o qual produz uma tensão em seus terminais, maior que o antigo elemento de SiC), e há o surgimento da corrente de magnetização. Se o tempo de duração da energização for longo ocorre a atuação indevida da proteção.

Um detalhe relevante no desenvolvimento de pesquisas envolvendo transformadores utilizado em alta e extra-alta tensão, é o fato dos dispositivos possuírem também transformadores de corrente ou de potência, conforme a necessidade, atuando no sistema; cuja finalidade é reduzir o nível de tensão ou corrente para possibilitar a leitura e operação de equipamentos de monitoração e proteção. A representação destes equipamentos e a eficiência das simulações computacionais envolvendo tal tema são discutidos por Kezunovic [18], em um trabalho que apresenta um modelo experimental de representar, no programa EMTP, os transformadores de corrente presentes no sistema. O trabalho discute a simulação de transformadores de corrente e comparações com resultados práticos. Os resultados obtidos são satisfatórios, sendo de relevância as observações das possibilidades de simulação, utilizando softwares de transitórios eletromagnéticos como o EMTP.

2.2-Aplicações de proteção diferencial de transformadores

A determinação se há uma falta interna no transformador ou a situação de corrente de magnetização é de suma importância, visando resguardar a integridade do equipamento e garantir a continuidade do fornecimento de energia. Sidhu [19]

propôs um método para identificação em tempo real de falta interna no equipamento ou situação de corrente de magnetização. O método proposto apresenta a transformação modal para realizar a análise instantânea em transformadores trifásicos tipos Y-Y e Δ -Y (os mais utilizados em Sistemas Elétricos de Potência). O método descreve todo o sistema de proteção, incluindo o microprocessador e os resultados de testes. São descritas simulações em transformadores com níveis de tensão baixos, porém a eficiência do método é constatada, atuando entre 10ms e 20ms, o que pode ser um longo tempo, dependendo do tipo e severidade da falta.

As faltas atribuídas a corrente de magnetização podem ocorrer também devido a presença de capacitores para correção de fator de potência, ou a saturação dos transformadores de corrente que são responsáveis por transmitir o sinal, após sua atenuação, para os equipamentos de análise. Liu [20] realizou estudos envolvendo estes tópicos. A 2ª harmônica surge de forma muito intensa quando ocorrem energização no transformador. A presença desta harmônica é menos intensa quando há uma falta interna. Este trabalho se baseia neste fato e no tempo de atenuação da 2ª harmônica: o qual é mais suave e longo quando há corrente de magnetização que o tempo de atenuação da 2ª harmônica quando ocorre falta interna no transformador. A proposta de um sistema de proteção desenvolvido e baseado nestes fatos é realizada de forma prática e simples. Este método tem limitações que devem ser ressaltadas, como será observado ao longo deste trabalho.

Um método para discriminação entre energização e falta interna, baseado no fluxo de potência em transformadores foi proposto por Yabe [21]. Com base no fato de que uma falta interna consome elevados níveis de potência, é proposta a monitoração do fluxo de potência entre os terminais de entrada e saída do transformador. O trabalho propõe uma nova forma de se obter dados e resultados

relativos a este problema. A proposta é visivelmente aplicável a situações onde a 2ª harmônica seja de elevado valor, o que ocorre em cabos de extra-alta tensão subterrâneos com uma expressiva presença de elementos capacitivos. O problema dos ajustes necessários do sistema de proteção pode ser um dos empecilhos deste sistema de proteção, devido a particularidade que deverá ser observada em cada caso.

Existem diversas técnicas utilizando ferramentas inteligentes que podem ser aplicadas para determinar a ocorrência de uma falta interna em um transformador ou a presença de uma corrente de magnetização. Perez [22] propõe a utilização de Redes Neurais Artificiais para discernir entre estas duas possibilidades. Apesar dos resultados serem interessantes, ressalta-se que o trabalho utilizou dados reais de um transformador para simular a situação de corrente de magnetização, porém faz uso de uma simulação computacional para as faltas internas. A operação utiliza uma janela de 12 amostras, contendo um ciclo completo de uma das tensões do primário do transformador. A solução da arquitetura das Redes Neurais Artificiais apresentada é laboriosa, porém o uso de Redes Neurais Artificiais é justificável devido a seu ótimo desempenho no reconhecimento de padrões.

A utilização de *Wavelets* para análise de sinais, compressão de dados, entre outros, tem se mostrado cada vez mais presente em Sistemas Elétricos de Potência. Proposições para utilização da *Transformada Wavelet* como ferramenta para problemas de ressonância em sistemas de distribuição aterrados proposto por Chaari [23]; detecção de faltas de alta impedância apresentado por Wai [24] e Huang [25]; qualidade da energia elétrica e análise de distúrbios por Poisson [26], são alguns exemplos da utilização desta técnica, na atualidade.

A utilização de Transformadas Wavelet na proteção diferencial foi proposta

por Gómez–Morante[27], apresentando um transformador monofásico para determinação da situação de falta interna ou corrente de magnetização. Apesar dos dados utilizarem uma elevada taxa amostral e a *Transformada Wavelet* ser utilizada, causando a necessidade de uma grande quantidade de cálculos computacionais, os resultados apresentados são satisfatórios e encorajam utilização desta ferramenta para estudos mais elaborados sobre este assunto.

A utilização de Transformada Discreta Wavelet e Redes Neurais Artificiais foi proposta por Mao [28]. Foram realizadas simulações, envolvendo dois transformadores distintos, sendo o sinal amostrado a uma frequência de 25kHz, e a análise do comportamento do sinal em um intervalo de tempo. A energia espectral resultante da decomposição da Transformada Discreta Wavelet é utilizada para entrada em uma Rede Neural Artificial, visando obter uma padronização dos resultados. O treinamento da Rede Neural Artificial, utiliza uma quantidade de dados elevada. 80% dos dados gerados são utilizados no treinamento da Rede Neural Artificial e apenas os 20% restantes utilizados para atestar a qualidade da Rede Neural Artificial proposta. O trabalho apresenta excelentes resultados, comprovando a possibilidade de utilização de Transformadas Discretas Wavelet como uma ótima alternativa a proteção diferencial de transformadores. Porém, há necessidade de um maior número de testes para a configuração e arquitetura escolhidas envolvendo Redes Neurais Artificiais.

3 – FUNDAMENTOS DE WAVELETS

3.1 – Introdução

A utilização de diversas técnicas matemáticas para análise de sinais é uma prática comum em muitas áreas de pesquisa, entre elas em Sistemas Elétricos de Potência. O emprego de métodos matemáticos para decomposição dos sinais em uma ou mais funções matemáticas conhecidas é um dos objetivos de muitas dessas técnicas. Ao se analisar um sinal representado por uma função matemática conhecida pode ser possível: interpretar, obter um padrão ou mesmo prever o comportamento desse sinal de modo eficiente.

Durante a ocorrência de falhas nos Sistemas Elétricos de Potência a maioria dos sinais obtidos apresentam transitórios e ruídos, o que torna sua análise complexa e laboriosa. O emprego de técnicas de análise dos sinais é então imprescindível, na maioria dos casos.

3.2 – Breve descrição da Análise de Fourier

Quando são tratados sinais estacionários, a análise de Fourier tem sido utilizada como algoritmo padrão. No entanto, quando são tratados sinais não estacionários, diversos algoritmos podem ser considerados, entre eles alguns envolvendo *Wavelets*. [29]

A análise de Fourier visa converter uma função $f(t)$ em uma combinação linear de componentes senoidais, cada uma com uma dada frequência.[29] A representação matemática de uma função $f(t)$ seria obtida com a equação: [30]

$$f(t) \approx a(0) + \sqrt{2} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} a(n) \cos 2\pi n t + \sqrt{2} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} b(n) \sen 2\pi n t \quad (3.1)$$

onde as constantes $a(0)$, $a(1)$, $a(2)$,... e $b(1)$, $b(2)$,... são chamadas de coeficientes de Fourier de $f(x)$, obtidas pelas equações:

$$\begin{aligned} a(0) &= a_f(0) = \int_0^1 f(t) dt; \\ a(n) &= a_f(n) = \int_0^1 f(t) \cos 2\pi n t dt, \text{ para } n \geq 1; \\ b(n) &= b_f(n) = \int_0^1 f(t) \sen 2\pi n t dt, \text{ para } n \geq 1; \end{aligned} \quad (3.2)$$

Se $f(t)$ é uma função periódica de período T , a Série de Fourier de $f(t)$ é: [29]

$$f(t) \approx \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_n e^{2\pi i k t} \quad (3.3)$$

Sendo os números da seqüência $\{c_n; n \in \mathbb{Z}\}$ conhecidos por coeficientes de Fourier da função f , determinados pela fórmula:

$$c_n = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) e^{-i\lambda_n t} dt \quad (3.4)$$

as frequências $\lambda_n = 2\pi n/T$ são chamadas de *frequências de Fourier*.

No entanto, a análise de Fourier apresenta problemas com relação a sua utilização, entre eles:

- As funções analisadas devem ser periódicas.
- Os sinais devem ser analisados utilizando-se informações de múltiplos de sua frequência fundamental, sendo que os dados desconhecidos ou ausentes neste intervalo devem ser preenchidos por zero, o que danifica efetivamente a análise, em alguns casos.
- Ocorrem fenômenos que influem diretamente na análise do sinal, como sobreposição de espectros e *Fenômeno de Gibbs*.
- A análise de Fourier não é obtida em função do tempo, analisando-se apenas um período do sinal.
- Em alguns casos é necessário conhecer todo um período do sinal para ser possível realizar sua decomposição.

Visando ampliar a eficiência da Transformada de Fourier, foram empregadas diversas técnicas, como a FFT (*Fast Fourier Transform*) e a STFT (*Short Time Fourier Transform*). A FFT visa agilizar o cálculo da Transformada de Fourier, enquanto a STFT visa otimizar os detalhes em função do tempo, perdidos nas análises realizadas apenas em um período do sinal. São criadas janelas de dados em intervalos, e analisados separadamente, conforme mostra a Figura 10.[31]

FIGURA 10—Exemplo de uma Transformada de Fourier (e) e uma STFT (d)

3.3—Introdução a Wavelets

Recentemente, um elevado número de estudos envolvendo análise de sinais com *Wavelets* tem apresentado ótimos resultados. Tal fato tem despertado o interesse de inúmeros pesquisadores sobre as propriedades, vantagens e aplicações envolvendo *Wavelets*. A história das *Wavelets* remonta a Fourier (1807), passando por Haar (1910), Calderón (1960), Grossmann e Morlet (1980), até os dias de hoje.[29]

Um dos aspectos relevantes das *Wavelets* é que as mesmas são localizadas no tempo (ou espaço), contrariamente ao que ocorre nas funções trigonométricas (como na Análise de Fourier). Este aspecto torná-as ideais para análise de sinais não estacionários transitórios.[29] Enquanto na análise de Fourier toda função periódica com período 2π de quadrado integrável ($L^2(0,2\pi)$) é gerada por superposição de exponenciais complexas, como mostrado na eq. (3.3), obtidas por dilatações da função exponencial, as *Wavelets* possibilitam trabalhar com $L^2(\mathbb{R})$, através de uma única função. Supondo que esta função seja ψ , ela poderá sofrer dilatações (ou compressões), assim como translações, como pode ser observado na Figura 11.

FIGURA 11—Mudança de dilatações e translações de uma Wavelet

Pode-se obter tal comportamento com a expressão apresentada a seguir:[29]

$$\Psi_{a,b}(x) = |a|^{-1/2} \Psi\left(\frac{x-b}{a}\right) \quad a, b \in \mathbb{R}, a \neq 0. \quad (3.5)$$

A função ψ , na eq. (3.5), é chamada *Wavelet-mãe*, e usualmente valores especiais são utilizados para a e b : $a=2^{-j}$ e $b=k \cdot 2^{-j}$, sendo $j, k \in \mathbb{Z}$.

A função será estabelecida como *Wavelet* se satisfizer certas propriedades: possuir oscilação, possuir ou não simetria, podendo ou não possuir continuidade suave. Existem inúmeras funções que satisfazem tal condição, sendo que algumas delas possuem o nome de seus criadores, como *Haar*, *Symmlet*, *Daubechies*, entre outras. A Figura 12 apresenta uma forma de onda *Wavelet*.

FIGURA 12—Exemplo de uma Wavelet Morlet

Entre as funções *Wavelet*, a conhecida como *Daubechies* possui algumas peculiaridades, tais como: detecção da presença de baixa amplitude de sinais, curta duração, rápido decaimento e uma peculiar forma de oscilação. Algumas destas características são tipicamente encontradas em alguns eventos envolvendo Sistemas Elétricos de Potência[31].

Por analogia com a Análise de Fourier, considera-se o espaço $L^2(\mathfrak{R})$ de todas as funções mensuráveis de quadrado integrável sobre $\mathfrak{R}$. As funções devem decair para zero quando $t \rightarrow \infty$. Logo, ao procurar ondas que geram $L^2(\mathfrak{R})$, elas devem decair rapidamente a zero. Devem-se considerar dilatações (compressões) e translações de uma única função ψ , de modo a cobrir $\mathfrak{R}$. Pode-se considerar *Wavelets*: [29]

$$\psi_{j,k}(t) = \psi(2^j t - k), \quad j, k \in \mathbb{Z}. \quad (3.6)$$

Ou seja, $\psi_{j,k}(t)$ é obtida de $\psi(t)$ por uma dilatação binária 2^j e por uma translação diádica $k2^{-j}$. Este seria um caso particular da eq. (3.5). As funções apresentadas na eq. (3.6) formam uma base que não é necessariamente ortogonal. No entanto, seria interessante, em *Wavelets*, a utilização de funções ortogonais, que apresentam a vantagem de permitir uma reconstrução exata do sinal original a partir dos coeficientes de sua transformada (como ocorre na Transformada de Fourier).[29]

Considerando-se uma base ortonormal gerada de ψ :

$$\psi_{j,k}(t) = 2^{j/2} \psi(2^j t - k), \quad j, k \in \mathbb{Z} \quad (3.7)$$

qualquer $f(t)$ de quadrado integrável sobre $\mathfrak{R}$ será:

$$f(t) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_{j,k} \psi_{j,k}(t) \quad (3.8)$$

os coeficientes das Wavelets podem ser determinados:

$$c_{j,k} = \langle f, \psi_{j,k} \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi_{j,k}(t) dt$$

Algumas *Wavelets* também podem ser geradas pela função escala (ϕ), ou Wavelet-pai, sendo ϕ a solução da equação:

$$\phi(t) = \sqrt{2} \sum_k l_k \phi(2t - k) \quad (3.9)$$

Esta função gera uma família ortonormal em $L^2(\mathfrak{R})$,

$$\phi_{j,k}(t) = 2^{j/2} \phi(2^j t - k), \quad j, k \in \mathbb{Z} \quad (3.10)$$

quando então é possível se obter ψ através de ϕ , com a expressão:

$$\psi(t) = \sqrt{2} \sum_k h_k \phi(2t-k) \quad \text{onde: } h_k = (-1)^k l_{1-k} \quad (3.11)$$

As equações (3.9) e (3.11) são conhecidas como equações de dilatação. Na realidade, l_k e h_k são coeficientes de filtros passa-baixa e passa-alta, respectivamente, utilizados para calcular a Transformada Discreta Wavelet (TDW). É possível determinar estes coeficientes:

$$l_k = \sqrt{2} \int_{-\infty}^{\infty} \phi(t) \phi(2t-k) dt \quad (3.12)$$

$$h_k = \sqrt{2} \int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) \phi(2t-k) dt$$

3.4-A Transformada Discreta Wavelet

O cálculo dos coeficientes *Wavelet* para todas as escalas e dilatações possíveis não é viável. É escolhida uma parte de escalas e posições para realizar estas operações, fundamentada em uma base de potência 2 (diádica), conforme eq. 3.6. Esta análise é obtida pela Transformada Discreta Wavelet.[31]

Uma maneira eficiente de utilizar a TDW é o algoritmo de *Mallat* (1989) chamado de piramidal. Na realidade, existem vários algoritmos piramidais, como o desenvolvido por *Daubechies* (1992), conhecido como "em cascata".[29] O algoritmo usa filtros passa-baixa (l_k) e passa alta (h_k), como mostra a eq. 3.12.

Pode ser observado na Figura 13 a forma como o sinal é decomposto, no primeiro estágio o sinal é dividido em duas metades da banda de frequência, enviado para os filtros passa-alta e passa-baixa onde serão reduzidos novamente a metade da banda de frequência e reenviados para os filtros seguintes sucessivamente. Utilizam-se apenas os dados de baixa frequência do sinal para prosseguir a decomposição. Para evitar o aumento do número de amostras a cada duas saídas do filtro uma é desprezada (indicada por $\downarrow 2$). O sinal pode então ser comprimido, uma vez que usualmente apenas a baixa frequência é utilizada. Pode-se obter o sinal original se forem conhecidos todos os valores dos coeficientes intermediários.

FIGURA 13—Detalhes da decomposição de uma TDW

A Transformada Wavelet apresenta certas vantagens sobre a Transformada de Fourier, uma vez que a análise ocorre modificando-se a escala ou

o deslocamento no tempo da forma de onda. A escala irá mudar o “comprimento” da *Wavelet*, enquanto o deslocamento irá mudar sua posição com relação a sua posição original. Pode-se recorrer a STFT para analisar o sinal ao longo do tempo, diminuindo-se a janela de uma TDF, porém alguns sinais analisados necessitam de todo um ciclo do sinal para se obter um resultado coerente com o esperado. Situações em que componentes harmônicas particulares são necessárias para se obter uma análise ou diagnóstico podem exigir que todo um ciclo esteja disponível. Cabe salientar, no entanto, que a utilização da Análise Wavelet, em quaisquer estudos, necessitará impreterivelmente da determinação de características singulares no que compete ao diagnóstico dos sinais analisados.

A Análise Wavelet é uma nova ferramenta, que atualmente vem sendo empregada com mais frequência. Estudos promissores como os citados na Revisão Bibliográfica revelam os inúmeros recursos que podem advir da Análise Wavelet envolvendo sinais. Este trabalho desenvolve uma pesquisa que se propõe a analisar a utilização de Transformadas Discretas Wavelet na discriminação entre falta interna e energização em um transformador de potência.

4-SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DOS TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA ESTUDADOS

4.1-Introdução ao programa de simulação computacional ATP

O programa computacional conhecido por EMTP (*Eletromagnetic Transients Program*) foi desenvolvido por Herman H. Dommel, na década de 60, em uma agência do Departamento de Energia dos Estados Unidos da América, a BPA (Bonneville Power Administration) e é baseado em trabalhos anteriores na ABB (*Asea Brown Boveri*), elaborados por Frey e Althammer.[32]

Entre 1964 a 1973, diversas rotinas foram introduzidas no trabalho de Dommel. Quando ele foi para a *British Columbia University*, Scott Meyer assumiu o desenvolvimento dos trabalhos. Em conjunto com a BPA, foram desenvolvidos com a contribuição dos usuários o EMTP, tornando-se uma excelente ferramenta de simulações de transitórios eletromagnéticos.[32]

Em 1982, a EPRI (*Electric Power Research Institute*) investiu no EMTP em conjunto com outras empresas como a *United States Bureau of Reclamation*, *Western Area Power Administration*, *Ontario Hydro*, *Hydro Quebec*, *Canadian Electrical Association* e ABB e assinaram um acordo de utilização do mesmo, mantendo o programa sob domínio público. Porém, em 1984, a EPRI decidiu não permitir que o programa continuasse sob domínio público, tornando-o comercial. Tal fato criou a cisão do grupo de trabalho e surgiu o ATP (*Alternative Transients*

Program), com um grupo sediado na Bélgica, cujo desenvolvimento se baseia diretamente no EMTP e possui como característica o fato de ser de domínio público.[32][33]

O programa possui uma saída detalhada das informações solicitadas, as quais podem ser fornecidas mediante um arquivo texto que contém as informações a respeito do sistema elétrico a ser analisado. A forma de apresentação da informação é extremamente rígida, devendo o alinhamento e a ordem dos caracteres serem seguidas rigorosamente, havendo possibilidade de erros na execução ou interpretação se não forem observadas as devidas formas do arquivo utilizado. Há possibilidade de gerar estes dados, a partir de programas apropriados como o *ATPDraw*, que permitem a visualização da informação e geração dos arquivos através de recursos visuais.[34]

Com a utilização desta ferramenta, é possível uma análise no domínio do tempo ou da frequência, assim como efetuar cálculos envolvendo componentes, circuitos ou grandes SEPs, baseado nas informações disponibilizadas ao programa. A eficiência dos resultados apresentados pelo programa tem sido acompanhada por um longo período de tempo, tendo se mostrado muito próximo a realidade.

O arquivo com os dados, fornecidos ao ATP, é apresentado sob a forma de blocos de textos, conhecidos como *cartões*, onde estão armazenados os dados relativos ao sistema elétrico estudado e os dados solicitados na simulação. Existem diversos *cartões*, sendo, inclusive, possível a criação de cartões com funções e características particulares do usuário, através da linguagem *Fortran* ou na montagem de modelos utilizando os já existentes.

4.2-Os transformadores de potência analisados

Os sistemas utilizados baseiam-se nos estudos de Segatto [33] e Coury [35], que desenvolveram um modelo de transformador para o ATP, visando a simulação de situações de falta interna, energização, faltas externas e a atuação de relés diferenciais para a proteção do mesmo.

4.2.1-Diagrama simplificado dos sistemas utilizados

Foram utilizados dois sistemas distintos para os estudos, sendo os mesmos descritos a seguir.

4.2.1.1 – Primeiro sistema estudado

O primeiro sistema estudado consiste basicamente de uma fonte trifásica de 138kV/30MVA a 60Hz conectado a um transformador trifásico aterrado 138kV(Δ):13,8kV(Y-aterrado)/25MVA (Transformador 1), uma linha de distribuição e carga, conforme ilustrado, na Figura 14.

FIGURA 14 – Sistema elétrico estudado

Uma linha de distribuição de 5km, cujos dados foram fornecidos pela CPFL (Companhia Paulista de Força e Luz) foi conectada entre o transformador e a carga.

Uma carga de $19,044\Omega$ e f.p. 0,92 indutiva foi conectada ao final da referida linha de distribuição. Com estes dados é possível determinar o valor da indutância desta carga, como segue:

$$\begin{aligned} Z &= \frac{U^2}{S} = \frac{(13,8.10^3)^2}{10.10^6} = 19,044 \Omega \\ R &= 19,044.0,92 = 17,520 \Omega \\ \phi &= \arccos(0,92) = 0,4027158 \text{radianos} \\ L &= \frac{19,044.\text{sen } \phi}{2.\pi.60} = 19,789 \text{mH} \end{aligned} \quad (4.1)$$

Há chaves internas e externas ao transformador (Figura 14), para simular faltas internas ou para simular faltas externas e energização sem carga. As chaves de comutação utilizadas possuem resistência desprezível ($0,001\Omega$).

4.2.1.2 – Segundo sistema estudado

O segundo sistema estudado é baseado no primeiro sistema, porém consiste de uma fonte trifásica de 69kV/6,25MVA a 60Hz conectado a um transformador trifásico 69kV(Δ):13,8kV(Y-aterrado)/6,25MVA (Transformador 2), uma linha de distribuição e carga, no mesmo formato ilustrado na Figura 14.

Uma linha de distribuição fictícia foi conectada entre o transformador e a carga, baseada nos parâmetros utilizados no primeiro sistema utilizado.

Uma carga de $114,264\Omega$ e f.p. 0,92 indutiva foi conectada ao final da referida

linha de distribuição. O valor da impedância desta carga é $R=105,12\Omega$ e $L=118,78\text{mH}$.

Como no primeiro sistema existem chaves internas ao transformador e externas ao mesmo, para simular faltas internas, externas e energização sem carga. Da mesma forma do primeiro sistema as chaves de comutação utilizadas possuem resistência desprezível ($0,001\Omega$).

4.2.2—O modelo do transformador estudado

O modelo do transformador utilizado em ambos os sistemas inclui a conexão entre três transformadores monofásicos distintos, como representado, na Figura 15.

FIGURA 15—Circuito do transformador em detalhes

Uma das formas de considerar o efeito de saturação em transformadores em simulações no programa computacional ATP é a determinação da curva *fluxo*×*Corrente de Magnetização* ($[\text{Vs}] \times [\text{A}]$). Tal curva pode ser obtida através da

rotina SATURA, presente no programa ATP. Esta rotina requer os dados de excitação de corrente, tensão e perdas, ou ainda os dados de corrente RMS de magnetização em função da tensão de excitação. Os dados dos transformadores utilizados nas simulações foram obtidos da CPFL (Companhia Paulista de Força e Luz). A Tabela 1 Apresenta os dados do Transformador 1 utilizado no primeiro sistema.

Tabela 1—Curva de saturação do Transformador 1

Corrente(A)	Fluxo (Vs)
1,1	26,9
3,3	29,6
20,8	32,9
129,1	34,4
380,8	35,3

A curva apresentada em um gráfico mono-log na Figura 16, mostra a curva de saturação utilizada como uma aproximação da curva de saturação do Transformador 1. Foi utilizada a técnica de Spline Cúbico para obter a suavidade visualizada na referida figura.

FIGURA 16—Curva de saturação fluxo–corrente do Transformador 1

Os dados da impedância do primário e secundário do transformador foram deduzidos e são apresentados a seguir:

$$\begin{aligned}
 Z_{base-primário} &= \frac{V_{base}^2}{S_{base}} = \frac{138000^2}{25 \cdot 10^6} = 761,76 \Omega \\
 Z_{base-secundário} &= \frac{V_{base}^2}{S_{base}} = \frac{13800^2}{25 \cdot 10^6} = 7,6176 \Omega
 \end{aligned}
 \tag{4.2}$$

Os valores das reatâncias em *pu* do primário e secundário são iguais, como ocorre na maioria dos transformadores comerciais, com um valor de 0,04495pu. A relação entre a reatância e a resistência, no primário e secundário (*X/R*), é de 32,68. É possível a determinação dos valores do circuito equivalente do transformador, como descrito a seguir:

$$\begin{aligned}
 L_{\text{primário}} &= \frac{761,76 \cdot 0,04495}{2 \cdot \pi \cdot 60} = 90,828 \text{ mH} \\
 L_{\text{secundário}} &= \frac{7,6176 \cdot 0,04495}{2 \cdot \pi \cdot 60} = 0,908276 \text{ mH} \\
 R_{\text{primário}} &= \frac{X_{\text{primário}}}{32,68} = 1,047770 \Omega \\
 R_{\text{secundário}} &= \frac{X_{\text{secundário}}}{32,68} = 0,010478 \Omega
 \end{aligned} \tag{4.3}$$

Todas as situações de energização, falta entre espiras e falta interna ao transformador são analisadas, utilizando o ATP. As faltas entre espiras são realizadas com o seccionamento do circuito interno do transformador, com uma chave que poderá realizar uma conexão com a terra ou entre espiras, como mostrado no circuito apresentado na Figura 18, podendo ocorrer durante a operação ou durante a energização.

De forma semelhante a apresentada acima, os dados da curva de saturação do Transformador 2 foram obtidos. A Figura 17 apresenta a curva de saturação utilizada para realizar as simulações do Transformador 2 no programa ATP.

FIGURA 17—Curva de saturação fluxo—corrente do Transformador 2

Para realizar as faltas internas nos transformadores seus enrolamentos são seccionados, como apresentado na Figura 18.

FIGURA 18—Simulação da situação de falta interna no transformador

Nota-se a presença de chaves que irão seccionar o primário dos transformadores em mais de uma parte. Neste seccionamento, a indutância e a resistência do primário são divididas, considerando-se o ponto da falta o fator da divisão, então:

$$\begin{aligned} R_{\text{primário}} &= R_1 + R_c \\ X_{\text{primário}} &= \omega L_1 + \omega L_c \end{aligned} \quad (4.4)$$

Os enrolamentos são divididos, seguindo a Tabela 2, apresentada a seguir. Durante a divisão do enrolamento é considerada uma igual distribuição dos valores de indutância e resistência, visando simplificar o modelo e a análise.

Tabela 2–Divisão do enrolamento primário em 4 seccionamentos

Transformador 1			
% do enrolamento	Resistência(Ω)	Indutância(mH)	Tensão(kV)
Primário			
10%	0,104777	9,0828	13,8
40%	0,419108	36,3312	55,2
40%	0,419108	36,3312	55,2
10%	0,104777	9,0828	13,8
Transformador 2			
% do enrolamento	Resistência(Ω)	Indutância(mH)	Tensão(kV)
Primário			
10%	0,5028	15,07	6,90
10%	0,5028	15,07	6,90
10%	0,5028	15,07	6,90
70%	3,5200	105,50	48,30

Um exemplo de listagem utilizada no ATP para as simulações se encontra no Apêndice I. É possível, na listagem apresentada, realizar as simulações de operação em regime, energização, falta interna e falta externa, com possibilidade de variações em seus parâmetros. O sinal é simulado com uma frequência amostral para cálculos de 122,88kHz, porém a amostragem do sinal para análise é tomada a 256 amostras por ciclo a 60Hz (15,36kHz).

4.2.3–Determinação da corrente diferencial

Muitos dos transformadores utilizados em circuitos elétricos de potência são do tipo ΔY . Caso um transformador esteja conectado neste formato a determinação

das correntes diferenciais se dará através das equações:

$$\begin{aligned} I_{difA} &= i_A - (i_a - i_c) \frac{1}{K} \\ I_{difB} &= i_B - (i_b - i_a) \frac{1}{K} \\ I_{difC} &= i_C - (i_c - i_b) \frac{1}{K} \end{aligned} \quad (4.5)$$

Os subíndices em letras maiúsculas se referem ao primário e os valores em letras minúsculas ao secundário do transformador. Nos valores indicados, o valor de K fornece a relação entre as espiras do primário(1) e secundário(2) do transformador, onde:

$$K = \frac{N_1}{N_2} \quad (4.6)$$

As Figuras 19 e 20 mostram o resultado das simulações com relação a corrente diferencial para uma falta interna ao transformador, bem como para uma situação de energização a vazio respectivamente, para o Transformador 1.

FIGURA 19—Exemplo de simulações no ATP de falta interna

FIGURA 20—Exemplo de simulações no ATP de energização a vazio

4.2.4–Utilização do efeito da saturação dos TCs nas simulações

Almejando simular o SEP estudado da forma mais real possível, foi incluído nas simulações o efeito de saturação dos TCs, em casos de elevada corrente diferencial, como ocorre na prática.

Os dados relativos à saturação, utilizados para os TCs nas simulações do ATP, foram obtidos da CPFL, sendo que estes equipamentos operam com os transformadores de potência analisados. As Figuras 21 e 22, apresentadas a seguir, mostram as curvas de saturação dos TCs utilizados nos sistemas simulados na rotina *SATURATION* do ATP.

FIGURA 21–Curva de saturação do TC utilizado no primeiro sistema

FIGURA 22–Curva de saturação do TC utilizado no segundo sistema

4.3-Descrição das simulações realizadas

Para realizar os estudos envolvendo *Wavelets* com o sinal gerado através de simulações no ATP, alguns procedimentos foram padronizados:

- O tempo de simulação foi de 84ms.
- A taxa amostral utilizada para análise foi escolhida de modo a se obterem 256 amostras por ciclo, sendo a frequência amostral de 15,36kHz, obtida através da reamostragem dos dados simulados com uma frequência de 122,88kHz no ATP. Foram realizados testes com taxas amostrais maiores e menores (sempre múltiplos de 2^n , $n \in \mathbb{Z}$), porém este valor de taxa amostral se mostrou mais eficiente, sendo a possibilidade de sua implementação menos onerosa.
- Foi realizado, para ambos os sistemas, um total de 513 simulações sem a presença da saturação dos TCs, e 1.368 simulações com a presença da saturação dos TCs. As simulações abrangeram situações de energização sem carga, faltas internas e externas ao transformador, e variações de carga em situações de faltas. A Tabela 3 apresenta as diferentes simulações executadas.

Tabela 3-Simulações executadas para os dois sistemas.

<i>Tipo de Simulação</i>	<i>Sem o efeito de saturação dos TCs</i>	<i>Com o efeito de saturação dos TCs</i>
Energização	171 simulações	171 simulações
Faltas Internas*	342 simulações	1.026 simulações
Faltas Externas	171 simulações**	171 simulações
* As Faltas Internas incluem faltas do enrolamento para terra e falta entre espiras.		
** Nenhum caso sensibilizou o relé.		

–A energização de um transformador geralmente ocorre quando a curva de tensão se encontrar próxima do valor mais baixo de tensão possível, situação que pode ser devidamente detectada por equipamentos apropriados. Neste estudo foram analisadas energizações de 11ms a 29ms, em todas as fases. Foi considerada a possibilidade de ocorrência de energização em qualquer ponto da curva de tensão. O referido fato se deve à possibilidade de existir um pequeno lapso entre a ordem de acionamento e o real acionamento dos contactos.

–Foram colhidos os valores das correntes diferenciais das três fases analisadas, sendo os valores das três correntes diferenciais analisadas com todos os critérios discriminantes utilizados neste trabalho.

–Foram também realizadas simulações de falta interna entre os enrolamentos das espiras das fases A, B e C, obedecendo-se o seccionamento apresentado na Tabela 2. Foram simuladas ainda faltas entre as espiras das fases A, B e C, e a terra no intervalo de tempo de 11ms a 29ms, com um passo de 1ms. Foram também realizadas simulações de faltas externas que sensibilizaram o relé diferencial, nas simulações com a presença da saturação dos TCs. As mesmas simulações sem a presença da saturação dos TCs não sensibilizaram a proteção diferencial.

–Os dados obtidos foram normalizados, visando padronizar os dados a serem analisados. O maior valor de corrente diferencial (em módulo) é igualado a 1 e os demais valores serão sempre menores ou iguais a este valor.

–Foram realizadas simulações de rejeição de carga e de faltas externas, sem excessiva severidade para atestar a eficiência da proteção diferencial utilizada, a qual não deveria ser sensibilizada para estes casos.

–Todas as simulações foram realizadas igualmente nos dois sistemas analisados, com as mesmas combinações de tempos de energização e de faltas.

4.4–Detalhes do programa de simulação MATLAB®

Inicialmente criado por Cleve Moler e Jack Little, o programa Matlab® é amplamente utilizado na engenharia e em outros ramos das ciências exatas. A possibilidade de se utilizarem rotinas de programação semelhantes às existentes em linguagem C, a facilidade na geração e na manipulação de gráficos científicos, somadas ao conjunto de rotinas matemáticas previamente disponíveis, torna a utilização deste aplicativo adequada aos estudos apresentados neste trabalho.

Foi criada uma rotina no Matlab® que simula a completa proteção diferencial do transformador de potência estudado. Após a simulação no ATP, esta rotina efetua a leitura dos dados, realiza a operação de um relé diferencial e ainda a reamostragem, executa a rotina de cálculos utilizando *Wavelets* e realiza o diagnóstico de falta ou de energização no transformador, bem como a lógica diferencial de proteção. Os fluxogramas equivalentes serão mostrados no próximo capítulo.

5-APLICAÇÃO DE WAVELETS NA PROTEÇÃO DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA

O capítulo a seguir apresenta uma descrição de um novo critério de discriminação entre faltas internas e energizações a vazio em transformadores de potência, sendo este o problema fundamental analisado neste estudo.

Inicialmente serão apresentados os fluxogramas para proteção diferencial de transformadores com subrotinas para discriminação entre faltas internas e energização, utilizando-se a TDF e a TDW. Em seguida, é dada ênfase ao método de discriminação entre energização e falta interna, utilizando-se TDW. Ao final do capítulo encontram-se exemplos e comparações das simulações desenvolvidas neste trabalho entre o método convencional baseado na TDF, o método proposto da TDW, bem como uma combinação do uso de TDW e Redes Neurais Artificiais.

5.1-Fluxograma de proteção diferencial de transformadores utilizando TDF

A Figura 23 apresenta um fluxograma geral, convencionalmente utilizado para proteção diferencial de transformadores, utilizando a restrição de harmônicas, através da TDF.

FIGURA 23—Fluxograma do dispositivo de proteção diferencial utilizando TDF

O Apêndice II apresenta em detalhes um algoritmo baseado neste fluxograma e um programa em Matlab®. Observa-se, no fluxograma, que inicialmente as correntes diferenciais do transformador são obtidas através dos TCs presentes no sistema. Posteriormente estes sinais serão analisados pelo relé diferencial, o qual atuará se o sinal exceder um determinado valor, conforme o exposto no item 1.4.4. Uma janela de dados de 1 ciclo é aberta com dados de pós-falta, a uma taxa amostral de 15,36kHz, armazenando um total de 256 amostras. É realizada a TDF nestes dados, visando extrair a 2ª harmônica deste ciclo. A forma de discriminação deste fluxograma é baseado na restrição da 2ª harmônica; se esta exceder uma percentagem determinada da componente fundamental, a ocorrência é classificada como energização. Caso contrário, há uma classificação de falta interna.

5.2-Fluxograma de proteção diferencial de transformadores utilizando TDW

A Figura 24 apresenta um fluxograma proposto neste trabalho para a proteção diferencial de transformadores de potência, utilizando a TDW.

Como pode ser observado, o fluxograma é semelhante ao utilizado na Figura 23, que utiliza a restrição de 2ª harmônica através da TDF, porém o mesmo contém uma subrotina para discriminação de situações de faltas internas e de energização baseadas na TDW. O mesmo abre uma janela de dados de pós-falta com diferentes quantidades de amostras. A frequência amostral adotada também é de 15,36kHz.

FIGURA 24-Fluxograma do dispositivo de proteção diferencial utilizando TDW

Neste fluxograma, uma vez detectada a corrente diferencial, através da característica de operação do relé, uma janela amostral é aberta com dados de pós-falta. Esta janela poderá ser de 1, $\frac{1}{2}$ ou $\frac{1}{4}$ de ciclo. Estes dados serão analisados utilizando-se a TDW, cujo diagnóstico utilizará apenas uma das parcelas desta decomposição. O sinal analisado será decomposto até a obtenção de D1 da TDW (vide Figura 13). Será realizada, então, uma análise da quantidade de valores da decomposição D1 que ultrapassem um valor de limiar. O valor de 10^{-4} para o limiar foi utilizado nestes estudos, para os dois transformadores simulados. Caso a quantidade de sinais superiores ao limiar seja maior que uma determinada percentagem estipulada, será indicada a situação de energização. Caso contrário, uma situação de falta interna será indicada, e ocorrerá um sinal de abertura do respectivo disjuntor. Deve ser ressaltado que a lógica descrita foi implementada através do programa Matlab® e encontra-se no Apêndice III.

Cabe salientar que os programas desenvolvidos, utilizando discriminações com TDF e TDW, efetuam a leitura das inúmeras simulações realizadas, apresentando, ao final, um relatório dos erros e acertos do método utilizado e gerando gráficos das curvas analisadas.

5.3-Atuação do relé diferencial percentual

O relé diferencial percentual utilizado nas simulações permite um ajuste adequado, visando a uma atuação semelhante à dos relés convencionais presentes nos SEPs.

Os ajustes realizados visaram obter a melhor sensibilidade do relé, excluindo situações de regime e pequenos transitórios. As Figuras 25 e 26 exemplificam a

operação do relé no Transformador 2, mostrando a corrente diferencial A (I_{difA}), conforme apresentado no item 1.3.4. A Figura 25 mostra a situação de falta externa A-terra, próxima à carga aos 10ms. A Figura 26 apresenta uma situação de falta interna ocorrendo em 10% do enrolamento A para terra, aos 15ms.

FIGURA 25—Exemplo de restrição do relé percentual

FIGURA 26—Exemplo de atuação do relé percentual

5.4-Método de discriminação entre falta interna e energização utilizando o método do limiar

Durante as simulações, foram perceptíveis as diferenças presentes nas componentes de alta frequência das Transformadas Discretas Wavelet, quando se analisa o sinal de energização e o sinal de falta interna ao transformador considerado. Tal situação foi determinante para a criação dos critérios de discriminação das situações descritas.

Com o intuito de se criar um método de discriminação baseado na Transformada Wavelet, as correntes diferenciais normalizadas provenientes do transformador a ser protegido foram submetidas a TDW. Inúmeras opções foram testadas como *função mãe*, porém a que apresentou melhor resultado foi a *Daubechies 4*, que pode ser observada na Figura 27.

FIGURA 27-Função Daubechies 4, escala (e) e função (d)

As funções *Daubechies* são enumeradas e conhecidas como *Daubechies 1*, *Daubechies 2*, e assim sucessivamente. Exceto a *Daubechies 1* (também conhecida como *Haar*), não existe uma função *Daubechies* explícita definida. A função

Daubechies é uma das mais populares na aplicação de *Wavelets*. [26][28][29][31][36]

O sinal das correntes diferenciais é decomposto, como pode ser observado na Figura 13. Após analisar as decomposições de alta-frequência e baixa-frequência em diversos níveis da TDW, observou-se uma particularidade presente, pertinente à alta-frequência da primeira decomposição (D1). É possível observar a presença de um nível do sinal além de um certo limiar, durante uma situação de energização do transformador em mais de 50% do sinal na decomposição D1, sendo que tal fato não se observa na grande maioria dos casos de uma situação de falta interna.

Após tal observação, um critério de discriminação foi estabelecido. Após a simulação utilizando o ATP, o sinal é submetido a uma normalização e decomposto com a TDW, e submetido então a um critério de método do limiar. Caso os sinais das três correntes diferenciais analisadas possuam de 50% a 95% do sinal D1 da decomposição acima de um limiar, será indicada uma situação de energização, caso isto não ocorra, é indicada uma situação de falta interna.

Mesmo com uma reduzida taxa amostral, tal situação de discriminação ainda é observada. Como citado em 4.2, a taxa amostral de 256 amostras/ciclo foi estabelecida como padrão, e considerada satisfatória. Após testes com diferentes taxas amostrais, cabe salientar que taxas amostrais superiores a este valor operam com maior eficiência (mais de 97% de acerto em alguns casos), o mesmo não ocorrendo com valores inferiores a 128 amostras/ciclo. Visando atestar a qualidade do método, diferentes janelas de dados foram utilizadas para a análise, como pode ser visto na Tabela 4.

Tabela 4–Janela de dados utilizados pela TDW

Ciclo	Número de Amostras
1	256
1/2	128
1/4	64

Os sinais analisados foram amostrados em 1 ciclo completo, $\frac{1}{2}$ ciclo e $\frac{1}{4}$ de ciclo para as TDW. A utilização de uma menor quantidade de dados torna possível a obtenção de um diagnóstico mais rápido entre a situação de energização e falta interna. Para efeito comparativo, os sinais também foram analisados utilizando-se a TDF. O critério de discriminação se baseia na presença da 2ª harmônica, como citado anteriormente. Quando esta possui valor entre 20% e 60% da componente fundamental é estabelecida uma situação de energização.[37] Quando esta componente apresenta um valor muito pequeno, comparado ao valor da componente fundamental (menor que o limite estabelecido), é estabelecida uma situação de falta interna. A TDF foi utilizada apenas na situação em que há amostragem de 1 ciclo completo do sinal, uma vez que é impossível determinar com precisão a presença de harmônicas com uma janela de amostragem menor que esta, utilizando-se TDF, até o presente momento.

5.5–Simulações do sistema de proteção sem o efeito de saturação de TCs

5.5.1–Exemplos utilizando a TDW

Durante as simulações sem a presença do efeito da saturação dos TCs, foi constatado que a discriminação entre faltas internas e energizações é mais simples.

Os resultados obtidos, utilizando-se a TDW, são extremamente satisfatórios, e mais eficientes que os utilizados nas técnicas convencionais, uma vez que não é necessário aguardar um ciclo completo para que ocorra o diagnóstico. Após a busca de um critério, utilizando TDW, para uma correta discriminação, foi observada a presença de um sinal extremamente ruidoso na componente D1 da TDW (utilizando-se *Daubechies 4*), na situação de energização a vazio do transformador. Tal característica não estava presente de forma tão marcante nas situações de falta interna no transformador. Tal fato, como citado anteriormente, pode ser comprovado com as figuras que são apresentadas a seguir, neste capítulo.

Na Figura 28 é apresentada uma situação de energização a vazio, do Transformador 1, de todas as fases, simultaneamente aos 12ms. Apenas a curva da corrente diferencial I_{dife} é mostrada, em conjunto com as decomposições da TDW, para este sinal. É vislumbrada a presença de uma componente D1 extremamente ruidosa, após o momento da energização do transformador. Na Figura 29 é apresentada uma situação de falta interna nas espiras da fase B do Transformador 1, aos 15ms. Para efeito de comparação, a mesma corrente diferencial apresentada na Figura 28 é mostrada. Pode-se notar que a componente D1 da TDW, na Figura 29, não apresenta o mesmo nível de ruído, presente na situação de energização a vazio.

FIGURA 28 –Análise da TDW para um caso de energização

FIGURA 29 –Análise da TDW para o caso de uma falta interna

As figuras citadas apresentam a análise de mais de 4 ciclos do sinal, sendo um ciclo de pré-falta e os demais de pós-falta. As figuras demonstram a possibilidade de discriminação entre situações de energização e falta interna no transformador. O comportamento da componente D1 da TDW se mostra presente, mesmo após mais de um ciclo da ocorrência da situação de energização ou falta. Deve-se esclarecer, no entanto, que tal fato não implica a necessidade de um longo período de dados de pós-falta para correta identificação.

As demais figuras apresentadas irão utilizar, para critérios de discriminação, dados de pós-falta variando de um ciclo completo a um quarto de ciclo do sinal, utilizando-se a presença de ruído na componente D1 como critério de discriminação entre energização a vazio e falta interna.

Os dados analisados utilizaram apenas um ciclo de pós-falta ou menos, como citado. Os dados apresentados têm seus valores normalizados conforme o critério anteriormente exposto (item 4.2).

Todas as simulações foram realizadas igualmente nos dois sistemas analisados, com as mesmas combinações de tempos de energização e faltas. Na Figura 30 é utilizado um ciclo do sinal de corrente diferencial, para a situação de energização do Transformador 2 a vazio. A energização ocorre nos tempos de 16ms, 17ms e 17ms para as fases A, B e C, respectivamente. É possível observar o elevado nível de ruído presente na decomposição D1 do sinal, indicando a situação de energização segundo o critério estabelecido neste trabalho.

FIGURA 30 –TDW – I_{difA} de um ciclo, energização a vazio (Transformador 2)

A Figura 31 apresenta também uma situação de energização no Transformador 2, nos tempos de 17ms, 16ms e 17ms para as fases A, B e C, respectivamente. O método de discriminação utilizando a TDW, porém apenas meio ciclo de informação é utilizado. É possível observar a presença de um sinal ruidoso na decomposição D1, de forma semelhante à obtida na Figura 28.

FIGURA 31 – TDW – I_{difA} de meio ciclo, energização a vazio (Transformador 2)

A Figura 32 apresenta a decomposição TDW de uma situação de falta interna no Transformador 2, utilizando-se um ciclo completo de dados. A espira A do transformador é ligada à terra a 30% de seu enrolamento, aos 22ms. Nota-se que a componente D1 apresenta um nível de ruído com valores numéricos muito inferiores aos presentes nas situações de energização.

FIGURA 32— $TDW-I_{difA}$ de um ciclo, de uma falta interna (Transformador 2)

Uma decomposição da TDW com meio ciclo do sinal, em uma situação de falta interna no Transformador 2, envolvendo 10% da espira da fase A para a terra aos 25ms, pode ser observada na Figura 33. Na decomposição é possível se observar que o nível de ruídos, na decomposição D1, não se encontra intenso como nas situações de energização, de forma semelhante ao observado na Figura 32.

FIGURA 33— $TDW-I_{difA}$ de meio ciclo, falta interna (Transformador 2)

5.5.2—Exemplos utilizando a TDF

Foram realizadas simulações para comparações com o método tradicional baseado na TDF (presença da 2ª harmônica), em todos os casos estudados, visando determinar a eficiência do método empregado. Os sinais inicialmente apresentados, como nas discriminações utilizando a TDW, não possuem a presença do efeito de saturação dos TCs. Os dados obtidos podem ser observados acompanhados de suas decomposições, nos exemplos das Figuras 34 e 35. Apenas a curva da corrente diferencial entre a fase A e a fase B é mostrada, porém todas as correntes diferenciais foram analisadas. Foi utilizado o programa Matlab® para desenvolver as simulações apresentadas, envolvendo a Transformada Discreta de Fourier (TDF)[31][38]. Estas

figuras possuem uma informação em forma de texto determinando se a rotina observou uma situação de falta interna ou uma energização. Apenas a corrente I_{difa} , conforme a eq. (4.5), é apresentada nas Figuras 34 e 35, porém todas as correntes diferenciais são analisadas nos diferentes métodos empregados. Os dados apresentados são seus valores normalizados, conforme o critério anteriormente exposto (item 5.2.1).

Na Figura 34 é utilizado um ciclo do sinal, para a situação da energização do Transformador 1, a vazio. A energização ocorre nos tempos de 16ms, 17ms e 17ms para as fases A, B e C respectivamente, como a simulação da Figura 30, porém com a utilização da TDF para discriminação entre a ocorrência de energização a vazio ou falta. Há, para este caso, a presença de uma 2ª harmônica elevada, indicando uma situação de energização, segundo os critérios de proteção diferencial convencionalmente utilizados.

FIGURA 34 –TDF, energização a vazio (Transformador 1)

A Figura 35 apresenta a decomposição TDF de uma situação de falta interna no Transformador 1, com um ciclo completo utilizado como amostra. A espira A do transformador é ligada à terra a 30% de seu enrolamento, aos 22ms, como a simulação da Figura 32. Nota-se que, na Figura 35, não é perceptível a presença da 2ª harmônica, conseqüentemente muito menor que o limite de 30% da fundamental, podendo isto ser utilizado como critério para discriminação entre falta interna e energização.

FIGURA 35—TDF— I_{difa} de um ciclo, falta interna (Transformador 1)

5.5.3—Comparação entre os métodos de TDW e TDF

Os resultados comparativos entre o critério convencional da TDF e a TDW encontram-se apresentados na Tabela 5, onde as simulações executadas em ambos os sistemas estudados foram analisadas e o diagnóstico foi verificado para um total de 1.026 casos (513 para cada tipo de transformador). A ausência do efeito de saturação dos TCs tornam o diagnóstico de energização e falta interna mais simples e

eficiente para ambos os métodos. Porém a utilização de TDW possibilita um diagnóstico em tempos de $\frac{1}{4}$ de ciclo (4,17ms), com alta eficiência.

Tabela 5—Resultados dos diagnósticos de TDW e TDF sem a presença do efeito de saturação dos TCs.

<i>Janela de dados</i>	<i>Transformador 1 (25MVA) – 494 simulações</i>					
	<i>TDF</i> <i>2ª harmônica > 20% fundamental</i>			<i>TDW</i> <i>50% dos pontos > limiar</i>		
	<i>Erros</i>		<i>Acertos</i> <i>(absoluto)</i>	<i>Erros</i>		<i>Acertos</i> <i>(absoluto)</i>
	<i>Energ.</i>	<i>Falta</i>		<i>Energ.</i>	<i>Falta</i>	
256 amostras – 1 ciclo	0	0	494 (100%)	0	0	494 (100%)
128 amostras – $\frac{1}{2}$ ciclo	N/D		N/D	0	0	494 (100%)
64 amostras – $\frac{1}{4}$ ciclo	N/D		N/D	0	2	492 (99,6%)
<i>Janela de dados</i>	<i>Transformador 2 (6,25MVA) – 513 simulações</i>					
	<i>TDF</i> <i>2ª harmônica > 20% fundamental</i>			<i>TDW</i> <i>50% dos pontos > limiar</i>		
	<i>Erros</i>		<i>Acertos</i> <i>(absoluto)</i>	<i>Erros</i>		<i>Acertos</i> <i>(absoluto)</i>
	<i>Energ.</i>	<i>Falta</i>		<i>Energ.</i>	<i>Falta</i>	
256 amostras – 1 ciclo	0	0	513 (100%)	0	0	513 (100%)
128 amostras – $\frac{1}{2}$ ciclo	N/D		N/D	5	0	508 (99,0%)
64 amostras – $\frac{1}{4}$ ciclo	N/D		N/D	3	0	510 (99,4%)

Salienta-se ainda que:

–O ajuste da inclinação da curva do relé diferencial foi de 30%, escolhido como a melhor entre as opções simuladas.

–Um total de 19 casos do Transformador 1 não foram detectados pelo relé diferencial. Portanto, um total de 494 casos foram analisados pelos métodos de TDF e TDW, neste sistema. Todos os casos do Transformador 2 foram detectados.

–Diferentes ajustes de percentagem de limiar na TDW e de percentagem da 2ª harmônica em relação à fundamental para a TDF foram utilizados (vide Anexo A). A Tabela 5 apresenta a situação ótima entre os valores testados.

5.6-Simulações do sistema de proteção com o efeito de saturação de TCs

Para tornar mais real o circuito analisado, foram inseridos os efeitos de saturação dos TCs na entrada e na saída do transformador principal.

Nas simulações envolvendo a presença da saturação dos TCs, erros adicionais aparecem quando da aplicação do método convencional baseado na TDF. As Figuras 36 e 37 mostram os sinais com a presença da saturação dos TCs. O sinal é obtido a uma taxa amostral de 256 amostras por ciclo (15,36kHz), como nos sistemas anteriormente estudados. Posteriormente o sinal é normalizado, apresentando seu maior valor, em módulo, igual a 1, e os demais valores referidos a este. O critério de detecção também utiliza a função *Daubechies 4* como função mãe da TDW, como nos sistemas anteriores.

5.6.1-Exemplos utilizando a TDF

A Figura 36 apresenta uma corrente diferencial (I_{difa}) para a situação de energização a vazio do Transformador 1, nos tempos de 21ms para fase A, 20ms para fase B e 22ms para fase C. Nota-se a presença de uma 2ª harmônica acima de 60% da fundamental, indicando uma correta discriminação de energização do transformador. Tal detecção ocorreu para as três correntes diferenciais. Porém, no gráfico da Figura 37, que também apresenta uma das correntes diferenciais (I_{difa}), é possível se observar uma elevada componente de 2ª harmônica, como na figura anterior, mas a simulação é de uma situação de falta interna ao Transformador 1 (enrolamento A para terra aos 22ms). A detecção de energização, para esta situação, também ocorreu nas três correntes diferenciais. Pode-se observar que a inserção do

efeito de saturação dos TCs introduz erros aos dados para discriminação entre falta interna e energização, ocasionando mais erros de diagnóstico.

FIGURA 36—TDF da I_{difa} , energização a vazio (Transformador 1)

FIGURA 37—TDF da I_{difa} , falta entre as espiras—fase A (Transformador 1)

5.6.2-Exemplos utilizando a TDW

As Figuras 38 e 39 apresentam as mesmas simulações utilizadas nas Figuras 36 e 37. No entanto, o critério empregado utiliza a TDW. Em ambos os casos ocorre a correta discriminação entre a situação de energização (Figura 38) e a situação de falta interna (Figura 39). Pode-se observar, nas Figuras, a decomposição D1, e ainda a mesma em detalhe, sendo possível identificar a linha de limiar entre -1.10^{-4} e 1.10^{-4} para as simulações implementadas. Nota-se que praticamente todos os pontos na situação de energização (Figura 38) se encontram fora da região de limiar. Na Figura 39 é possível observar que a quantidade de ruído em uma situação de falta interna que ultrapassa o nível de limiar é muito menor que o observado na situação de energização apresentada na Figura 38.

FIGURA 38-TDW- I_{difB} de um ciclo, energização a vazio (Transformador 1)

FIGURA 39— $TDW-I_{difA}$ de um ciclo, falta interna (Transformador 1)

Mesmo quando a quantidade de dados envolvidos é menor que um ciclo completo, o critério de discriminação ainda atua corretamente. Tal situação pode ser observada nas Figuras 40 e 41, onde uma janela de meio ciclo de dados, com 128 amostras, é utilizada para a discriminação da proteção do Transformador 2. Na Figura 40 é apresentada uma situação de energização a vazio do Transformador 2, com as três fases fechadas simultaneamente aos 14ms. A Figura 41 apresenta uma situação de falta interna no Transformador 2, resultado da simulação da ocorrência de um curto entre as espiras da fase A envolvendo de 20% a 30% do enrolamento do transformador, ocorrida aos 22ms. Observa-se, no detalhe da decomposição D1 da TDW, a diferente concentração de dados na região do limiar para os dois casos apresentados.

FIGURA 40-TDW- I_{difA} de meio ciclo, energização a vazio (Transformador 2) FIGURA 41-TDW- I_{difA} de meio ciclo falta interna (Transformador 2)

5.6.3-Comparação entre os métodos de TDW e TDF

As análises e os critérios envolvendo a presença da saturação dos TCs junto ao circuito não sofreram modificações quanto ao seu critério, porém os erros aumentaram consideravelmente para o método que utiliza TDF. O método utilizando TDW mostrou-se mais eficiente e apresentou bons resultados para as mesmas simulações em cada um dos sistemas analisados. Os resultados estão expressos na Tabela 6 a seguir. Observa-se que os resultados obtidos pela TDW são superiores aos obtidos pelo método convencional, empregando TDF.

Tabela 6-Resultados dos diagnósticos de TDW e TDF com a presença do efeito de saturação dos TCs

<i>Janela de dados</i>	<i>Transformador 1 (25MVA) – 969 simulações</i>					
	<i>TDF</i> <i>2ª harmônica > 50% fundamental</i>			<i>TDW</i> <i>90% dos pontos > limiar</i>		
	<i>Erros</i>		<i>Acertos</i> <i>(absoluto)</i>	<i>Erros</i>		<i>Acertos</i> <i>(absoluto)</i>
	<i>Energização</i>	<i>Falta</i>		<i>Energização</i>	<i>Falta</i>	
256 dados – 1 ciclo	0	228	741(76,5%)	0	0	969(100%)
128 dados – ½ ciclo	N/D		N/D	0	1	968(99,9%)
64 dados – ¼ ciclo	N/D		N/D	0	45	924(95,4%)
<i>Janela de dados</i>	<i>Transformador 2 (6,25MVA) – 1.197 simulações</i>					
	<i>TDF</i> <i>2ª harmônica > 50% fundamental</i>			<i>TDW</i> <i>65% dos pontos > limiar</i>		
	<i>Erros</i>		<i>Acertos</i> <i>(absoluto)</i>	<i>Erros</i>		<i>Acertos</i> <i>(absoluto)</i>
	<i>Energização</i>	<i>Falta</i>		<i>Energização</i>	<i>Falta</i>	
256 dados – 1 ciclo	7	47	1.143(95,5%)	2	0	1.195(99,8%)
128 dados – ½ ciclo	N/D		N/D	0	0	1.197(100%)
64 dados – ¼ ciclo	N/D		N/D	0	141	1.056(88,2%)

Salienta-se ainda que:

- O número de casos estudados foi maior que os casos sem o efeito da saturação dos TCs, uma vez que o modelo com o efeito da saturação dos TCs representa, de forma mais correta, a realidade.
- A curva de inclinação do relé foi de 30%, como nas simulações sem o efeito de saturação dos TCs, anteriormente citadas.
- Foram realizadas 1.197 simulações para cada um dos dois sistemas estudados, porém o relé diferencial não detectou 228 casos de faltas internas no primeiro sistema estudado (transformador de 25MVA), reduzindo o número de casos, efetivamente analisados para este sistema, para 969 casos.
- Foram realizadas simulações supondo variação da carga presente no sistema para as situações de falta interna e externa, com oscilações de 10% acima e abaixo de seu valor nominal, mantendo um f.p. de 0,92.
- Diferentes ajustes de percentagem de limiar na TDW e de percentagem da 2ª harmônica em relação à fundamental para a TDF foram utilizados (vide Anexo A). A Tabela 6 apresenta a situação ótima entre os valores testados.

Os erros observados nas simulações, quando o critério da TDF é empregado, ocorreram devido a diagnósticos incorretos de faltas internas, classificadas como energizações e situações de energizações a vazio, classificadas como faltas. Para as mesmas simulações, quando o critério de decomposição da TDW é empregado, ocorrem erros apenas quanto à classificação de 2 energizações no segundo sistema analisado (transformador de 6,25MVA), quando há faltas externas ou quando é utilizado menos que $\frac{1}{2}$ ciclo de dados na análise.

A utilização de diferentes quantidades de regiões de percentagem além do limiar, para determinar o correto diagnóstico, mostra-se eficiente quando se utiliza

de 65% a 85% dos sinais da decomposição D1, além da região de limiar demarcada. Ao se ampliar a região de limiar além de 85%, há uma diminuição na média dos erros em forma absoluta.

5.7-Método de discriminação entre falta interna e energização utilizando-se RNAs

Os resultados obtidos com o método proposto nesta tese, para discriminação entre energização e falta interna em transformadores, são bastante encorajadores, como pôde ser observado nas Tabelas 5 e 6. No entanto, ao reduzir a janela de dados para $\frac{1}{4}$ de ciclo, com o efeito da saturação dos TCs há uma redução considerável na precisão do método (vide Tabela 6).

Observa-se, no trabalho exposto, que existem características inerentes a TDW, possibilitando sua utilização na discriminação entre energização e falta interna em transformadores de potência. Porém, quando o tamanho da janela de dados é muito reduzido, é necessário o emprego de uma técnica auxiliar para a obtenção de melhores resultados, diferentemente da empregada anteriormente (método do limiar). Como a existência de um padrão foi comprovada neste trabalho, pode-se então recorrer a uma das inúmeras técnicas de reconhecimento de padrão existentes, visando-se melhores resultados em situações com uma janela de dados extremamente reduzida.

Com o intuito de demonstrar a viabilidade do emprego de uma destas técnicas para o diagnóstico apresentado, este item contempla a utilização de Redes Neurais Artificiais (RNAs), para a discriminação entre energização e falta interna em transformadores. Maiores detalhes sobre RNAs podem ser encontrados no Anexo B.

5.7.1–Dados utilizados nas simulações das RNAs

Para a realização das simulações utilizando RNAs foram tomados dados da decomposição D1 da TDW *Daubechies 4* das correntes diferenciais, de forma semelhante à empregada no método exposto ao longo deste trabalho. Os dados da decomposição D1 foram normalizados, sendo o maior valor absoluto igualado a 1. A taxa amostral utilizada foi de 64 amostras/ciclo ou 3,84kHz, porém, como apenas ¼ de ciclo foi utilizado, a RNA possui em sua entrada um total de 48 neurônios, 16 correspondentes a cada uma das três correntes diferenciais do transformador. Assim, uma taxa amostral menor que a das simulações anteriores apresentadas foi utilizada, visando evitar o excessivo esforço computacional, assim como a dificuldade para se obter a convergência das RNAs.

5.7.2–Parâmetros e características das RNAs empregadas

Para as simulações foi utilizada a arquitetura de Múltiplas Camadas. O método de *Backpropagation* foi empregado, com diferentes topologias. As simulações utilizadas são descritas ao longo deste capítulo, sendo 50% das simulações empregadas para a aprendizagem e 50% para testes. Os dados foram aleatoriamente escolhidos, porém com representação de todos os dados considerados relevantes para o treinamento. Inicialmente foi utilizada uma RNA para cada um dos transformadores estudados, e posteriormente os dados de ambos os sistemas foram utilizados no treinamento de uma única RNA. A Tabela 7, a seguir, apresenta o número de casos empregados no aprendizado e nos testes das RNAs.

Tabela 7—Número de casos empregados nas RNAs

<i>Sistema Simulado</i>	<i>Treinamento</i>	<i>Testes</i>
Transformador 1	485 casos	484 casos
Transformador 2	599 casos	598 casos
Transformador 1 + Transformador 2	1.083 casos	1.083 casos

Um total de 3 camadas foi utilizado nas RNAs testadas: uma camada de entrada e uma camada intermediária, ambas com uma quantidade de neurônios variável e uma camada de saída com um neurônio, como pode ser visto na Figura 42.

FIGURA 42 – Arquitetura padrão da RNA utilizada

As saídas foram padronizadas em 0 e 1, sendo o valor 0 para indicar energização, e o valor 1 para indicar falta interna. A função de ativação utilizada em todas as camadas da RNA foi a *log sigmoid* (vide Anexo B). Os valores iniciais dos

pesos foram determinados através da geração de valores aleatórios. Foi utilizado o recurso de *Momentum*, e a taxa de aprendizagem utilizada variou de 1,5 a 0,5. O erro médio quadrático, ou um número máximo de 50.000 iterações, foi utilizado como critérios de parada para o treinamento da RNA. O erro médio quadrático mínimo estipulado para garantir convergência foi de 0,1, na maioria dos casos.

5.7.3—Resultados obtidos com o emprego de RNAs

A RNA, treinada quando ambos os dados dos dois sistemas são utilizados, obteve um erro médio quadrático de 0,059 após 50.000 iterações. Seu treinamento pode ser observado na Figura 43. Os resultados obtidos dos pesos e ajustes aplicados nos testes apresentaram ótimos resultados, para os casos estudados.

FIGURA 43 – Treinamento de uma RNA para dados dos dois sistemas

A Tabela 8 apresenta um resumo das simulações das RNAs, assim como sua arquitetura e o índice de acerto nos testes. O programa Matlab utilizado para realizar os treinamentos das RNAs pode ser visualizado no Apêndice IV.

Tabela 8—Melhores resultados obtidos com as RNAs utilizadas

Sistema Simulado	Arquitetura Utilizada			Ciclos	Erro Médio Quadrático	Índice de Acerto nos Testes
	Camada					
	1	2	3			
Transformador 1	20	8	1	5.273	0,049	99,17%
						-4 faltas classificadas incorretamente
Transformador 2	30	10	1	2.052	0,049	99,67%
						-2 energizações classificadas incorretamente.
Transformador 1 e Transformador 2	48	15	1	50.000	0,059	95,38%
						Classificação incorreta de: -42 faltas -8 energizações

Observa-se na Tabela 8, que foi possível se obterem resultados com um índice de acerto superior a 95% utilizando apenas $\frac{1}{4}$ de ciclo da janela de dados. Este desempenho é superior ao obtido com o uso apenas do método do limiar, elaborado ao longo deste trabalho e apresentado no item anterior. Apesar de o treinamento de RNAs exigir um elevado esforço computacional, uma vez treinada esta RNA é desnecessário repetir este treinamento. Estes resultados levam, portanto, a concluir pela possibilidade de se empregarem métodos auxiliares em associação a TDW, particularmente a *Daubechies 4* e sua decomposição D1, para se obter uma discriminação eficiente entre energização e falta interna.

6-CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta um algoritmo para proteção diferencial de transformadores de potência, incluindo uma subrotina baseada na Transformada Discreta Wavelet, para discriminação de situações de falta interna e energização. A técnica fundamental inicialmente proposta visa determinar se uma quantidade de pontos mínima excedeu a um determinado limiar, classificando-se situações de energização e falta interna do transformador. Esta técnica foi empregada em dois sistemas distintos, com dois transformadores: um de 25MVA e um de 6,25MVA, baseados em dados reais fornecidos pela CPFL.

Mais de 3.500 simulações foram realizadas durante os estudos, com inúmeras considerações para aproximar os sistemas analisados de um sistema real, tais como: inclusão de um esquema completo de proteção para obtenção dos dados a serem analisados baseado na lógica da proteção diferencial percentual, simulação da presença da saturação nos transformadores de corrente, variação da inclinação da curva da proteção diferencial percentual, variação de carga, variação dos ângulos de incidência de faltas e energizações, inclusão de faltas internas em locais distintos dos enrolamentos, faltas externas, rejeição de carga, entre outras situações.

O método ora proposto mostrou-se adequado, com índices de acerto superiores a 95% para janelas de dados de 1 ciclo e $\frac{1}{2}$ ciclo, sendo necessário para sua utilização uma taxa amostral de 15kHz. A rápida discriminação das situações descritas, em alguns casos em menos de 9ms, é muito superior à desempenhada pelos

atuais dispositivos, e não exige um elevado esforço computacional devido à necessidade de apenas uma parcela dos dados referentes à decomposição do sinal através da Transformada Discreta Wavelet.

O desempenho do método foi comparado ao método convencional mais empregado, fundamentado na Transformada Discreta de Fourier e em sua 2ª harmônica. O método proposto apresenta resultados superiores aos obtidos pela Transformada Discreta de Fourier, quando comparados com as mesmas simulações realizadas neste trabalho.

Durante os estudos, diversas formas de “onda mãe” disponíveis em *Wavelets* foram testadas, e a *Daubechies 4* apresentou os melhores resultados para atuar como discriminante entre as situações de energização e falta interna. Todos os dados deste trabalho foram normalizados, porém a região de limiar manteve-se a mesma para os dois sistemas simulados. A possibilidade de se utilizar de forma generalizada a técnica, comprovada nas simulações realizadas, indica uma nova forma de se discriminarem situações de energização e de falta interna em transformadores.

Este trabalho também demonstra que em situações especiais, como por exemplo quando a janela de dados é de apenas $\frac{1}{4}$ de ciclo, é viável o emprego de outras técnicas avançadas de reconhecimento de padrão, conjuntamente com a Transformada Discreta Wavelet. Foram realizadas diversas simulações empregando-se Redes Neurais Artificiais, utilizando-se os dados da mesma decomposição da Transformada Discreta Wavelet (*Daubechies 4*). Os dados das correntes diferenciais foram inseridos como entradas nas Redes Neurais Artificiais, e diferentes arquiteturas foram testadas, até a obtenção de um índice de acerto superior a 95% para os testes realizados. Nestes casos, o tempo para diagnóstico pretendido foi inferior a 4,2ms.

Portanto, o emprego da Transformada Discreta Wavelet como ferramenta para discriminação entre as situações de energização e de falta se mostrou bastante eficiente. Seu uso em dispositivos de proteção é viável, isoladamente ou conjuntamente com técnicas avançadas de reconhecimento de padrão. Este fato encoraja a investigação do uso desta ferramenta matemática em outras aplicações envolvendo transformadores elétricos de potência e os demais equipamentos do SEP. As futuras pesquisas, como uma continuação deste trabalho, poderiam contemplar o desenvolvimento de um algoritmo completo para proteção de transformadores de potência, utilizando a lógica diferencial e o critério de discriminação aqui proposto, bem como discriminação para situações de sobreexcitação do transformador com base na quinta harmônica.

ANEXO A

São apresentadas a seguir Tabelas, obtidas através de diferentes ajustes de parâmetros, para comparações entre os métodos, empregados para discriminação entre falta interna e energização de transformadores, estudados neste trabalho.

A Tabela A1 apresenta os resultados obtidos com o método convencional, utilizando a restrição da 2ª harmônica da TDF. Foram empregados diferentes valores de percentagem entre a 2ª harmônica e a fundamental para a discriminação entre falta interna e energização.

Tabela A1–Diagnósticos utilizando a TDF

Índice de Acertos (%)				Percentagem da 2ª harmônica maior que a fundamental
<i>Transformador 1 Sem a presença da saturação do TC</i>	<i>Transformador 2 Sem a presença da saturação do TC</i>	<i>Transformador 1 Com a presença da saturação do TC</i>	<i>Transformador 2 Com a presença da saturação do TC</i>	
494 casos: 152 energizações 342 faltas internas	513 casos: 171 energizações 342 faltas internas	969 casos: 171 energizações 798 faltas internas	1.197 casos: 171 energizações 1.026 faltas internas	
Erros Falta: 0 (100%) Erros Energ.:0 (100%)	Erros Falta: 0 (100%) Erros Energ.:0 (100%)	Erros Falta: 417 (47,7%) Erros Energ.:0 (100%)	Erros Falta: 158 (84,6%) Erros Energ.:0 (100%)	20%
Erros Falta: 0 (100%) Erros Energ.:16 (89,5%)	Erros Falta: 0 (100%) Erros Energ.:0 (100%)	Erros Falta: 372 (53,4%) Erros Energ.:0 (100%)	Erros Falta: 69 (93,3%) Erros Energ.:0 (100%)	30%
Erros Falta: 0 (100%) Erros Energ.:88 (42,1%)	Erros Falta: 0 (100%) Erros Energ.:153 (10,5%)	Erros Falta: 304 (61,9%) Erros Energ.:0 (100%)	Erros Falta: 61(94,1%) Erros Energ.:0 (100%)	40%
		Erros Falta: 228 (71,4%) Erros Energ.:0 (100%)	Erros Falta: 47 (95,4%) Erros Energ.: 7 (95,9%)	50%
		Erros Falta: 155 (80,6%) Erros Energ.:45 (73,7%)	Erros Falta: 46 (95,5%) Erros Energ.: 13 (92,4%)	60%

As Tabelas A2, A3, A4 e A5 a seguir apresentam os resultados obtidos com o método proposto neste trabalho, utilizando a percentagem de pontos dentro do limiar da decomposição D1 da TDW (*Daubechies 4*). Foram empregados diferentes valores da percentagem de amostras dentro do limiar de 10^{-4} para a discriminação entre falta interna e energização para os transformadores estudados.

Tabela A2–Diagnósticos utilizando a TDW no Transformador 1 sem a presença do efeito de saturação dos TCs

<i>Transformador 1 sem o efeito de saturação dos TCs</i>		494 casos: 152 energizações 342 faltas internas	
<i>Índice de Acertos (%)</i>	<i>Percentagem acima do limiar</i>	<i>Índice de Acertos (%)</i>	<i>Percentagem acima do limiar</i>
Erros Falta: 0 (100%) Erros Energ.:0 (100%)	50% (1 ciclo)	Erros Falta: 0 (100%) Erros Energ.:0 (100%)	65% (1 ciclo)
Erros Falta: 0 (100%) Erros Energ.:0 (100%)	50% (½ ciclo)	Erros Falta: 0 (100%) Erros Energ.:0 (100%)	65% (½ ciclo)
Erros Falta: 2 (99,4%) Erros Energ.:0 (100%)	50% (¼ ciclo)	Erros Falta: 0 (100%) Erros Energ.:112 (26,3%)	65% (¼ ciclo)
Erros Falta: 0 (100%) Erros Energ.:0 (100%)	55% (1 ciclo)	Erros Falta: 0 (100%) Erros Energ.:0 (100%)	70% (1 ciclo)
Erros Falta: 0 (100%) Erros Energ.:0 (100%)	55% (½ ciclo)	Erros Falta: 0 (100%) Erros Energ.:0 (100%)	70% (½ ciclo)
Erros Falta: 2 (99,4%) Erros Energ.:0 (100%)	55% (¼ ciclo)	Erros Falta: 0 (100%) Erros Energ.:120 (21,1%)	70% (¼ ciclo)
Erros Falta: 0 (100%) Erros Energ.:0 (100%)	60% (1 ciclo)	Erros Falta: 0 (100%) Erros Energ.:0 (100%)	75% (1 ciclo)
Erros Falta: 0 (100%) Erros Energ.:0 (100%)	60% (½ ciclo)	Erros Falta: 0 (100%) Erros Energ.:0 (100%)	75% (½ ciclo)
Erros Falta: 2 (99,4%) Erros Energ.:0 (100%)	60% (¼ ciclo)	Erros Falta: 0 (100%) Erros Energ.:120 (21,1%)	75% (¼ ciclo)

Tabela A3—Diagnósticos utilizando a TDW no Transformador 2 sem a presença do efeito de saturação dos TCs

<i>Transformador 2 sem o efeito de saturação dos TCs</i>		513 casos: 171 energizações 342 faltas internas	
Índice de Acertos (%)	Percentagem acima do limiar	Índice de Acertos (%)	Percentagem acima do limiar
Erros Falta: 0 (100%) Erros Energ.:0 (100%)	50% (1 ciclo)	Erros Falta: 0 (100%) Erros Energ.:12 (93%)	65% (1 ciclo)
Erros Falta: 0 (100%) Erros Energ.:5 (97,1%)	50% (½ ciclo)	Erros Falta: 0 (100%) Erros Energ.:36 (78,9%)	65% (½ ciclo)
Erros Falta: 0 (100%) Erros Energ.:3 (98,2%)	50% (¼ ciclo)	Erros Falta: 0 (100%) Erros Energ.:14 (91,8%)	65% (¼ ciclo)
Erros Falta: 0 (100%) Erros Energ.:0 (100%)	55% (1 ciclo)	Erros Falta: 0 (100%) Erros Energ.:35 (79,5%)	70% (1 ciclo)
Erros Falta: 0 (100%) Erros Energ.:11 (93,6%)	55% (½ ciclo)	Erros Falta: 0 (100%) Erros Energ.:56 (67,3%)	70% (½ ciclo)
Erros Falta: 0 (100%) Erros Energ.:3 (98,2%)	55% (¼ ciclo)	Erros Falta: 0 (100%) Erros Energ.:23 (86,5%)	70% (¼ ciclo)
Erros Falta: 0 (100%) Erros Energ.:3 (98,2%)	60% (1 ciclo)	Erros Falta: 0 (100%) Erros Energ.:71 (58,5%)	75% (1 ciclo)
Erros Falta: 0 (100%) Erros Energ.:20 (88,3%)	60% (½ ciclo)	Erros Falta: 0 (100%) Erros Energ.:103 (39,8%)	75% (½ ciclo)
Erros Falta: 0 (100%) Erros Energ.:3 (98,2%)	60% (¼ ciclo)	Erros Falta: 0 (100%) Erros Energ.:41 (76%)	75% (¼ ciclo)

Tabela A4—Diagnósticos utilizando a TDW no Transformador 1 com a presença do efeito de saturação dos TCs

<i>Transformador 1 com o efeito de saturação dos TCs</i>		969 casos: 171 energizações 798 faltas internas	
Índice de Acertos (%)	Percentagem acima do limiar	Índice de Acertos (%)	Percentagem acima do limiar
Erros Falta: 0 (100%) Erros Energ.:0 (100%)	80% (1 ciclo)	Erros Falta: 0 (100%) Erros Energ.:9 (94,7%)	92,5% (1 ciclo)
Erros Falta: 13 (98,4%) Erros Energ.:0 (100%)	80% (½ ciclo)	Erros Falta: 0 (100%) Erros Energ.:9 (94,7%)	92,5% (½ ciclo)
Erros Falta: 77 (90,4%) Erros Energ.:0 (100%)	80% (¼ ciclo)	Erros Falta: 17 (97,9%) Erros Energ.:18 (89,5%)	92,5% (¼ ciclo)
Erros Falta: 0 (100%) Erros Energ.:0 (100%)	85% (1 ciclo)	Erros Falta: 0 (100%) Erros Energ.:27 (84,2%)	95% (1 ciclo)
Erros Falta: 3 (99,6%) Erros Energ.:0 (100%)	85% (½ ciclo)	Erros Falta: 0 (100%) Erros Energ.:18 (89,5%)	95% (½ ciclo)
Erros Falta: 69 (91,4%) Erros Energ.:0 (100%)	85% (¼ ciclo)	Erros Falta: 7 (99,1%) Erros Energ.:18 (89,5%)	95% (¼ ciclo)
Erros Falta: 0 (100%) Erros Energ.:0 (100%)	90% (1 ciclo)		
Erros Falta: 1 (99,9%) Erros Energ.:0 (100%)	90% (½ ciclo)		
Erros Falta: 45 (94,4%) Erros Energ.:0 (100%)	90% (¼ ciclo)		

Tabela A5–Diagnósticos utilizando a TDW no Transformador 2 com a presença do efeito de saturação dos TCs

<i>Transformador 2 com o efeito de saturação dos TCs</i>		1.197 casos: 171 energizações 1.026 faltas internas	
Índice de Acertos (%)	Percentagem acima do limiar	Índice de Acertos (%)	Percentagem acima do limiar
Erros Falta: 0 (100%) Erros Energ.:2 (98,8%)	60% (1 ciclo)	Erros Falta: 0 (100%) Erros Energ.:35 (79,5%)	80% (1 ciclo)
Erros Falta: 0 (100%) Erros Energ.:0 (100%)	60% (½ ciclo)	Erros Falta: 0 (100%) Erros Energ.:7 (95,9%)	80% (½ ciclo)
Erros Falta: 163 (84,11%) Erros Energ.:0 (100%)	60% (¼ ciclo)	Erros Falta: 87 (91,5%) Erros Energ.:12 (93%)	80% (¼ ciclo)
Erros Falta: 0 (100%) Erros Energ.:2 (98,8%)	65% (1 ciclo)	Erros Falta: 0 (100%) Erros Energ.:77 (55%)	85% (1 ciclo)
Erros Falta: 0 (100%) Erros Energ.:0 (100%)	65% (½ ciclo)	Erros Falta: 0 (100%) Erros Energ.:26 (84,8%)	85% (½ ciclo)
Erros Falta: 141 (86,3%) Erros Energ.:0 (100%)	65% (¼ ciclo)	Erros Falta: 62 (94%) Erros Energ.:37 (78,4%)	85% (¼ ciclo)
Erros Falta: 0 (100%) Erros Energ.:11 (93,6%)	70% (1 ciclo)	Erros Falta: 0 (100%) Erros Energ.:155 (9,4%)	90% (1 ciclo)
Erros Falta: 0 (100%) Erros Energ.:1 (99,4%)	70% (½ ciclo)	Erros Falta: 0 (100%) Erros Energ.:104 (39,2%)	90% (½ ciclo)
Erros Falta: 129 (87,4%) Erros Energ.:0 (100%)	70% (¼ ciclo)	Erros Falta: 37 (96,4%) Erros Energ.:96 (43,9%)	90% (¼ ciclo)
Erros Falta: 0 (100%) Erros Energ.:16 (90,6%)	75% (1 ciclo)	Erros Falta: 0 (100%) Erros Energ.:171 (0%)	95% (1 ciclo)
Erros Falta: 0 (100%) Erros Energ.:2 (98,8%)	75% (½ ciclo)	Erros Falta: 0 (100%) Erros Energ.:166 (2,9%)	95% (½ ciclo)
Erros Falta: 108 (89,5%) Erros Energ.:2 (98,8%)	75% (¼ ciclo)	Erros Falta: 12 (98,8%) Erros Energ.:156 (8,8%)	95% (¼ ciclo)

ANEXO B

B1–Fundamentos biológicos básicos e introdução as RNAs

O cérebro humano pode ser considerado o mais intrínseco dos computadores presentes no mundo. Existem diversas razões para se desejar que computadores operem como o cérebro humano, entre elas:

- A forma robusta como o cérebro opera; por exemplo células cerebrais morrem a todo o instante, porém o seu desempenho geral mantém-se inalterado.
- O cérebro opera com instruções extremamente complexas e incompletas.
- Possui um elevado paralelismo em seu processamento.
- Tratamento especial para situações difusas, como exemplo a possibilidade de recorrer a um "banco de dados" para tentar analisar uma situação inusitada.
- É pequeno, compacto e despende pouca energia para seu processamento.

A base do processamento realizado no cérebro humano segue as conexões existentes entre as estimadas 10^{11} células neurais, conhecidas por neurônios, presentes em sua composição.

O cérebro humano possui um processamento com elevado paralelismo. Os neurônios operam em paralelo, e encontram-se conectados por uma extensa malha de comunicação com ramificações. Estas ramificações de comunicação são realizadas por uma conexão principal longa, conhecida por axônio, cuja conexão terminal é feita através de uma conexão especial, a sináptica, e diversas ramificações

curtas, os dendritos. As conexões sinápticas geralmente ocorrem entre axônios e dendritos, e possuem um retardo na transferência do sinal da ordem de milésimos de segundos. A forma de comunicação entre os neurônios pode ser descrita como uma troca de impulsos elétricos. A existência da natureza elétrica entre neurônios foi constatada pela primeira vez por Galvani (1780). Estes impulsos são resultantes de um equilíbrio químico envolvendo a presença dos elementos sódio e potássio, conhecido como "bomba de sódio". O impulso nervoso é uma "onda" contínua que se propaga através da polarização e despolarização das membranas do axônio em toda sua extensão. Após o envio do sinal elétrico na conexão existe um tempo de refração, para que um próximo sinal possa ser enviado.

A idéia básica para a constituição de uma RNA envolve a possibilidade de "tomada de decisão" de um problema em estudo. A possibilidade de oferecimento de uma resposta a uma situação totalmente desconhecida e inesperada é a grande vantagem da utilização de Redes Neurais Artificiais.

O que deve garantir a obtenção de uma melhor resposta desejada é, além de uma arquitetura adequada, o treinamento da Rede Neural Artificial de forma eficiente. O treinamento da Rede Neural Artificial desenvolvida definirá a qualidade de suas respostas para as diferentes entradas as quais elas será submetida.

Pode-se "ensinar" a Rede Neural Artificial de duas maneiras básicas:

- Treinamento supervisionado*, aqui o aprendizado é realizado na base de uma comparação direta entre a saída fornecida pela RNA e a resposta correta, conhecida.
- Treinamento não supervisionado*, onde as informações fornecidas para a rede não possuem uma resposta conhecida. A única informação é a relação entre os dados de entrada ou sinais de entrada. A rede deve criar a partir destas relações suas saídas, conforme os sinais de entrada.

Cabe salientar que não apenas a forma como a RNA é treinada influi em seu desempenho, mas também a quantidade de casos utilizados em seu treinamento e a ordem com a qual estes casos são introduzidos para o treinamento da rede em questão.

Com as ferramentas matemáticas disponíveis podem-se elaborar diversos algoritmos de RNAs. Também é possível descrever as principais vantagens destes algoritmos com relação aos algoritmos convencionais de programação:

- Rápidas decisões em tempo real, para alguns problemas de amplo espectro.
- Pode prover soluções para problemas com situações inusitadas.
- Pode operar com problemas em parte da rede.
- Pode ser treinada "off-line".

A utilização de RNAs tem crescido muito nos recentes trabalhos de pesquisa, em diversos campos. Pode-se concluir que as grandes vantagens apresentadas por sua teorias; principalmente a possibilidade de obtenção de respostas independente da quantidade de dados, tem refletido positivamente nos meios científicos. Existem porém algumas desvantagens apresentadas pela utilização de Redes Neurais Artificiais, entre elas:

- A determinação da forma de treinamento deve ser muito bem estudada. A rede pode necessitar de novos treinamentos, a medida que ocorre variação significativa no comportamento dos dados de entrada.
- Não há uma maneira de garantir a máxima otimização na resposta.
- Não há garantias de se encontrar a melhor arquitetura possível.
- Há dificuldade em definir os parâmetros da RNA, tais como: taxa de aprendizagem, função de transferência, entre outros.
- A solução depende da forma como foi aplicado o treinamento à rede em questão.

–O processamento de uma rede neural biológica é paralelo. Em Redes Neurais Artificiais a maioria das simulações e processamentos envolvendo a utilização de microcomputadores deve-se limitar ao processamento serial presente nestes equipamentos no presente momento.

Apesar destes problemas as grandes vantagens citadas anteriormente resultam no grande atrativo que existe nas pesquisas de Redes Neurais Artificiais.

Pode-se dizer que, para problemas particulares onde a utilização de algoritmos específicos é possível, "Redes Neurais são a segunda melhor maneira de fazer tudo". Sua aplicação é justificável apenas onde métodos convencionais de resolução foram falhos ou insatisfatórios. No campo prático existem aplicações de Redes Neurais Artificiais em reconhecimento de padrões, visão computacional, desenvolvimento de teoremas matemáticos, aprendizado de paradigmas e interpretações de textos, elaboração de programas computacionais e recentes pesquisas se direcionam para proteção de SEPs.

B2–Redes Neurais Artificiais e o reconhecimento de padrões

Os primeiros estudos a respeito de RNAs originam dos conceitos psicológicos levantados por Aristóteles, envolvendo o cérebro humano. A representação de neurônios e suas conexões sob forma matemática é uma nova técnica, conhecida como Redes Neurais Artificiais(RNA) (ANN–do inglês "Artificial Neural Network"). Esta nova técnica biologicamente inspirada, ressurgiu após algumas décadas de seus primeiros estudos em nosso século.

O cérebro humano opera de forma extremamente complexa, e faz uso de um "banco de dados" com elevado número de informações, o qual não poderia ser

reproduzido fielmente por uma RNA. Todo o desenvolvimento da teoria e dos exemplos relativos a aplicação de RNA incluem modelamentos matemáticos de um neurônio extremamente simplificado. Os estudos com RNAs envolvem reconhecimento de padrões. As discussões desenvolvidas neste sentido serão particularizadas, devendo ocorrer a consulta das referências bibliográficas para maiores esclarecimentos quanto ao desenvolvimento matemático envolvido.

Deve-se levar em consideração que da mesma maneira que o cérebro deve ser treinado, mais precisamente os neurônios, para reconhecimento e análise de problemas, o mesmo deve ser feito com as RNAs.

B3–Modelos de Redes Neurais Artificiais de Multicamadas

Um dos pontos culminantes para o estudo de Redes Neurais Artificiais seria o modo como elas deveriam estar representadas, tanto matematicamente como fisicamente. A Figura A1 mostra um dos modelos mais utilizados na representação de Redes Neurais Artificiais de multicamadas.

FIGURA A1 – Arquitetura de uma Rede Neural Artificial

Esta é conhecida por rede de "perceptrons" de duas camadas. As entradas fornecidas para a Rede Neural Artificial se encontram sob a indicação de ξ_k na Figura, onde k indica o índice correspondente a entrada genérica fornecida. Os pesos W_{ij} e w_{jk} são os valores a serem calculados onde i indica o índice onde termina a conexão, j o índice de conexão de uma camada intermediária e k o índice da origem da conexão. Os valores O_i indicam a saída da Rede Neural Artificial, onde i indica o índice da saída.

A arquitetura conhecida por "perceptron" modela um neurônio tomando a soma ponderada de suas entradas e enviando o valor 1 se a soma for maior que um determinado valor inicial ajustável. Caso contrário ele envia o resultado 0. Este modelo segue os princípios de McCulloch e Pitts. Este tipo de representação foi desenvolvida por volta de 1962 por um grupo formado por Frank Rosenblatt. Este grupo buscava o melhor modo de encontrar os "pesos" apropriados, para trabalhos computacionais particulares.

As conexões, entre os neurônios de diferentes camadas, são representadas por linhas de ligação. Podem existir em uma RNA camadas conhecidas como "hidden layers" (camadas ocultas) cujo nome se refere a ausência de contato direto entre os dados de entrada ou saída, ocupando a posição de camadas intermediárias, com alimentação das informações encontradas nas camadas anteriores. As camadas ocultas se encontram indicadas na Figura A1 sob a forma de V_j , onde j representa seu índice de referência.

O método mais aplicado e estudado nesta última década envolve uma pesquisa inicializada a 20 anos atrás. Conhecida por "back-propagation" este método foi desenvolvido de forma mais ampla por Werbos (1974). Este algoritmo mostrou-se bastante eficaz no ajuste de valores dos "pesos" em unidades neurais (neurônios

artificiais) presentes em "perceptrons" de multi-camadas sucessivas. Ele utiliza a realimentação dos valores. Assim todas as camadas, inclusive as camadas ocultas, recebem informações com relação ao comportamento da rede segundo uma relação entre os dados de entrada e de saída da RNA. Esta idéia visa organizar um treinamento eficiente da RNA.

B4—O método de "Back-propagation"

O método de "back-propagation" foi desenvolvido por diversas vezes e diferentes pessoas, Bryson e Ho em 1969, Werbos em 1974, Parker em 1985 e Rumelhart, Hinton e Williams em 1986. O método de "back-propagation" visa fornecer os valores dos pesos W_{ij} , através do processo matemático de gradiente descendente. O método do gradiente descendente é aplicado através da definição de uma função de erro utilizada, ou função de custo. Esta função deverá ser minimizada e isto ocorre de modo a obter um ajuste para o par de entrada/saída fornecida a rede neural.

Observando a Figura A1, pode-se tomar o par entrada/saída correta por ξ_k^μ e ζ_k^μ . Como o processo de aplicação da RNA é interativo, o índice μ indicaria o número da interação corrente. Pode-se realizar um equacionamento a partir do modelo apresentado e obter uma relação entre os termos presentes no modelo e os valores do par entrada/saída. O equacionamento e o resultado final se encontram apresentados na eq. (A1).

$$\begin{aligned}
h_j^\mu &= \sum_k w_{jk} \xi_k^\mu \\
V_j^\mu &= g(h_j^\mu) = g\left(\sum_k w_{jk} \xi_k^\mu\right) \\
h_i^\mu &= \sum_j W_{ij} V_j^\mu = \sum_j W_{ij} g\left(\sum_k w_{jk} \xi_k^\mu\right) \\
\text{obtemos:} \\
O_i^\mu &= g(h_i^\mu) = g\left(\sum_j W_{ij} V_j^\mu\right) = g\left(\sum_j W_{ij} g\left(\sum_k w_{jk} \xi_k^\mu\right)\right)
\end{aligned} \tag{A1}$$

Omitidos os valores de ajuste de modo a facilitar a utilização das equações, o próximo passo é a aplicação de um método para diminuir o erro entre a saída calculada com os pesos presentes na RNA (O_i^μ) e os valores reais almejados (ξ_i^μ). Então, utilizando-se a eq. (A1) é possível adaptar a "função de custo" sendo um dos métodos para se calcular o valor de erro, ao equacionamento da RNA. A aplicação da equação de erro é observada na eq. (A2).

$$\begin{aligned}
\text{de:} \\
E[w] &= \frac{1}{2} \sum_{\mu i} [\xi_i^\mu - O_i^\mu]^2 \\
\text{obtemos:} \\
E[w] &= \frac{1}{2} \sum_{\mu i} [\xi_i^\mu - g(\sum_j W_{ij} g(\sum_k w_{jk} \xi_k^\mu))]^2
\end{aligned} \tag{A2}$$

Como a eq. (A2) é claramente uma função diferenciável para todos os pesos, é possível utilizar o algoritmo do gradiente descendente, visando minimizar o valor do erro, para que ocorra o "aprendizado" dos valores dos pesos. Após a aplicação do método do gradiente descendente obtemos a eq. (A3), fornecendo o pequeno ajuste ΔW_{ij} que será acrescido ao peso W_{ij} visando diminuir o erro $E[w]$.

$$\Delta W_{ij} = -\eta \frac{\partial E}{\partial W_{ij}} = \eta \sum_{\mu} [\xi_i^{\mu} - O_i^{\mu}] g'(h_i^{\mu}) V_j^{\mu} = \eta \sum_{\mu} \delta_i^{\mu} V_j^{\mu}$$

$$\text{onde: } \delta_i^{\mu} = g'(h_i^{\mu}) [\xi_i^{\mu} - O_i^{\mu}] \quad (A3)$$

Os valores de η são fornecidos de forma a diminuir o valor de ΔW_{ij} . A quantidade de operações realizadas é proporcional a quantidade de conexões. A existência de n conexões implica na realização de n operações da "função de custo". O cálculo de derivadas implicaria em n^2 operações. Em contraste, a aplicação do método de "back-propagation" possibilita o cálculo de n derivadas em n operações. Para a utilização da função de ativação $g(h)$ presentes nas equações (A1), (A2) e (A3), é normal a utilização de uma função diferenciável em toda sua extensão. Pode-se utilizar equações cujos valores estarão entre 0/1 como na eq. (A4), conhecida como função log sigmoid, ou entre ± 1 como na eq. (A5), conhecida por função tangente hiperbólica.

$$g(h) = f_{\beta}(h) = \frac{1}{1 + e^{-2\beta h}} \quad (A4)$$

$$g(h) = \tanh \beta h \quad (A5)$$

Os parâmetros β , presentes nas equações (A4) e (A5), são ajustados para valores 1 ou $1/2$.

Os passos a serem seguidos pelo método de "back-propagation" podem ser resumidos a seguir:

1) Tomemos os valores de W_{ij}^m como a conexão entre V_j^{m-1} a V_i^m , onde m indica a posição na camada.

2) Inicialização dos valores dos pesos, através de valores aleatórios gerados. Os pesos iniciais deverão ser de pequenos valores, números aleatórios entre 0 e 1 são normalmente aplicados a estes casos.

3) Escolhe-se um valor de ξ_k^μ utilizado no treinamento e aplica-se a camada de entrada ($m=0$). Então $V_k^0 = \xi_k^\mu$ para todos os valores de k .

4) Propaga-se o sinal para toda a RNA utilizando-se de (A6). Para cada valor de i e m até que o valor final da saída V_i^M tenha sido calculado.

$$V_i^m = g(h_i^m) = g\left(\sum_j w_{ij}^m V_j^{m-1}\right) \quad (A6)$$

5) Calcula-se os valores de δ para as camadas de saída, através de (A7), comparando-se o valor da atual saída V_i^M com a desejada ξ_i^μ para a interação μ utilizada. O processo é interrompido se for atingido um erro considerado satisfatório.

$$\delta_i^{m-1} = g'(h_i^{m-1}) \sum_j w_{ji}^m \delta_j^m \quad (A7)$$

6) Computa-se os valores dos δ_i das camadas precedentes, propagando-se o erro para trás, utilizando-se (A7). Utiliza-se estas equações para $m=M, M-1, \dots, 2$ até que todos os valores de delta tenham sido calculados para cada peso.

7) Utiliza-se (A8) para a atualização dos valores dos pesos onde teremos os novos valores para cada peso sendo $W_{ij}^{\text{nov}} = W_{ij}^{\text{anterior}} + \Delta W_{ij}$.

$$\Delta W_{ij}^m = \eta \delta_i^m V_j^{m-1} \quad (A8)$$

8)Retorna-se para (3) e inicia-se a nova interação.

Existem ainda muitas variações para aumentar a eficiência do método de "back-propagation"; como a aplicação de um "momentum", cuja função é fornecer alguma "inércia" ao método fazendo com que seja tomada uma média para o próximo valor de convergência utilizado, atenuando a ocorrência de oscilações divergentes; e utilização de outros métodos de convergência, entre outros. Existem diversos métodos matemáticos para transpor problemas encontrados no método, como as dificuldades para se conseguir uma convergência mais rápida.[39]

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Caminha, A. C. – *Introdução à Proteção dos Sistemas Elétricos* – Edgard Blücher – São Paulo – S.P. – 1977.
- [2] Phadke, A. G.; Thorp, J. S. – "*Computer relaying for power systems*", Reino Unido, Ed. John Wiley and Sons – 1988.
- [3] D'Ajuz, A. et. al – *Transitórios Elétricos e Coordenação de Isolamento* – Rio de Janeiro – Ed. Universidade Federal Fluminense – 1987.
- [4] Hayt, W. H. – *Eletromagnetismo* – 3ª edição – Rio de Janeiro – Ed. LTC – 1985.
- [5] Boffi, L. V. et. al – *Conversão Eletromecânica de Energia* – São Paulo – Ed. Edgard Blücher – 1977.
- [6] Oliveira, J. C. et. al – *Transformadores Teoria e Ensaios* – Edgard Blücher – São Paulo – S.P. – 1984
- [7] Araújo, C. A. et. Al – *Proteção de Sistemas Elétricos* – Rio de Janeiro – Ed. Interciência – 2002.
- [8] Kindermann, G. – *Proteção de Sistemas Elétricos de Potência* – Florianópolis – Ed. do autor – 1999.
- [9] Phadke, A. G.; Thorp, J. S. – "*Computer relaying for power systems*", Reino Unido, Ed. John Wiley and Sons – 1988.

- [10] Simone, G. A. – Transformadores Teoria e Exercícios – São Paulo – Ed. Érica – 1988.
- [11] Martignoni, A. – *Transformadores* – São Paulo – Ed. Globo – 1991.
- [12] Filho, J.M. – *Manual de Equipamentos Elétricos – vol. 1* – Rio de Janeiro – Ed. LTC – 1993.
- [13] Rajakovic, N., Semlyen, A. – *Investigation of the Inrush Phenomenon a Quasi-Stationary Approach in the Harmonic Domain* – IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4 No.4, 1989 – pp.2114–2120.
- [14] Lin, C. E., et. al – *Investigation of Magnetizing Inrush Current in Transformers Part I – Numerical Simulation* – IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8 No.1, 1993 – pp.246–254.
- [15] Lin, C. E., et. al – *Investigation of Magnetizing Inrush Current in Transformers Part II – Harmonic Analysis* – IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8 No.1, 1993 – pp.255–263.
- [16] Bastard, P., et. al – *A Transformer Model for Winding Faults Studies* – IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.9 No.2, 1994 – pp.690–699.
- [17] Hamel, A., et al. – *Nuisance Fuse Operation on MV Transformers During Storms* – IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.5 No.4, 1990 – pp.1866–1874.
- [18] Kezunovic, M., et. al – *Experimental Evaluation of EMTP-Based Current Transformer Models for Protective Relay Transient Study* – IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.9 No.1, 1994 – pp.405–413.
- [19] Sidhu, T.S., Sachdev M.S. – *On-line Identification of Magnetizing Inrush and Internal Faults in Three-Phase Transformers* – IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.7 No.4, 1992 – pp.1885–1891.

- [20]Liu, P., et. al – *Improved Operation of Differential Protection of Power Transformers for Internal Faults* – IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.7 No.4, 1992 – pp.1912–1919.
- [21]Yabe, K. – *Power Differential Method for Discrimination between Fault and Magnetizing Inrush Current in Transformers* – IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.12 No.3, 1997 – pp.1109–1115.
- [22]Perez, L. G., et. al – *Training an Artificial Neural Network to Discriminate Between Magnetizing Inrush and Internal Faults* – IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.9 No.1, 1994 – pp.434–441.
- [23]Chaari, O., et. al – *Wavelets: A New Tool for the Ressonant Grounded Power Distribution System Relaying* – IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.11 No.3, 1996 – pp.1301–1308.
- [24]Wai, D. C. T., Yibin, X. – *A Novel Technique for High Impedance Fault Identification* – IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.13 No.3, 1998 – pp.738–744.
- [25]Huang, S., Hsieh, C. – *High-impedance Fault Detection Utilizing a Morlet Wavelet Transform Approach* – IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.14 No.4, 1999 – pp.1401–1410.
- [26]Poisson, O. et. Al – *Detection and Measurement of Power Quality Disturbances Using Wavelet Transform* – IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.15 No.3, 2000 – pp.1039–1044.
- [27]Gómez-Morante, M., Nicoletti, D.W. – *A Wavelet-based Differential Transformer Protection* – IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.14 No.4, 1999 – pp.1351–1358.

- [28]Mao, P.L., Aggarwal R.K. – *A Novel Approach to the Classification of the Transient Phenomena in Power Transformers Using Combined Wavelet Transform and Neural Network*– IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.16 No.4, 2001 – pp.654–660.
- [29]Morettin, P. A. –*Ondas e Ondaletas* – São Paulo – Ed. EDUSP – 1999.
- [30]Wickerhauser – *Adapted Wavelet Analysis from the Theory to Software* – IEEE Press – Estados Unidos da América – 1993.
- [31]Mathworks – *Wavelet Toolbox User's Guide* – Estados Unidos da América – 1997.
- [32]Filho, J. A.; Pereira, M.P. – *ATP Alternative Transients Program – Curso Básico sobre Utilização do ATP* – Brasil – 1996.
- [33]Segatto, E. C. – *Redes Neurais Artificiais Aplicadas à Proteção Diferencial de Transformadores de Potência* – São Carlos – Dissertação (Mestrado) EESC-USP – 1999.
- [34]K. U. Leuven EMTP Center – *Alternative Transient Program Rule Book 1&2* – Estados Unidos da América – 1987.
- [35]Coury, D. V.; Campos, P.E.G.; Tavares, M.C. – *Modeling a Power Transformer for Investigation of Digital Protection Schemes* – Atenas, Grécia –The 8th International Conference on Harmonics and Quality of Power – 1998.
- [36]Littler, T.B.; Morrow, D.J. – *Wavelets for the Analysis and Compression of Power System Disturbances* – IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14 No.2, 1999 –pp.358–364.
- [37]Morán, A. V. – *Manutenção Elétrica Industrial* – Ed. Ícone – São Paulo –1996.

- [38]Kosbar, K. L. – *Speeding Up the FT Calculations – The FFT* – Estados Unidos da América –1998.
- [39]Jorge, D. C. – *Redes Neurais Artificiais Aplicadas a Proteção de Sistemas Elétricos de Potência*, São Carlos, 1997. 96 p. Dissertação (Mestrado)–Escola de Engenharia de São Carlos–Universidade de São Paulo.

APÊNDICE I

A seguir é mostrado um exemplo do arquivo para o ATP do primeiro sistema estudado, este é um dos modelos utilizados nas simulações computacionais:

Arquivo exemplo do ATP:

```
BEGIN NEW DATA CASE
C
C ARQUIVO BASE DA LINHA DE TRANSMISSÃO COM TRANSFORMADOR - Energização com TCs
C
8.138E-6.08400000
1 1 1 1 1 1
TACS HYBRID
$DISABLE
Simulacao da logica de abertura e fechamento do rele diferencial
$ENABLE
C Fontes
C <nome> <--T start<-- T stop
91CHAP -1. 1.
91CHBP -1. 1.
91CHCP -1. 1.
91CHAS -1. 1.
91CHBS -1. 1.
91CHCS -1. 1.
C
98IDIFA =(CHAP-((CHAS - CHCS) / (SQRT (3.))))
98IDIFB =(CHBP-((CHBS - CHAS) / (SQRT (3.))))
98IDIFC =(CHCP-((CHCS - CHBS) / (SQRT (3.))))
98IA =( (CHAP+((CHAS - CHCS) / (SQRT (3.))))/2)
98IB =( (CHBP+((CHBS - CHAS) / (SQRT (3.))))/2)
98IC =( (CHCP+((CHCS - CHBS) / (SQRT (3.))))/2)
98IRA =ABS(0.3*IA)
98IRB =ABS(0.3*IB)
98IRC =ABS(0.3*IC)
99COMPA 60 ZERO IDIFA IDIFA IDIFA IRA
99COMPB 60 ZERO IDIFB IDIFB IDIFB IRB
99COMPC 60 ZERO IDIFC IDIFC IDIFC IRC
99RELEA 60 PLUS1 ZERO ZERO 0.10 COMPA
99RELEB 60 PLUS1 ZERO ZERO 0.10 COMPB
99RELEC 60 PLUS1 ZERO ZERO 0.10 COMPC
98RELEH =RELEA.AND.RELEB.AND.RELEC
99RELE 64 RELH -1.0
98RELE =1
C CONDICÕES INICIAIS DO CIRCUITO DE HOLD
77RELE 1
98SINAL =.NOT.(RELE)
33IDIFA
33IDIFB
33IDIFC
33IRA
33IRB
33IRC
BLANK
C rede eletrica
$VINTAGE, 1
CH1A NO1A 1.000000000E-03 0.000000000E+00 0.000000000E+00 0
CH1B NO1B 1.000000000E-03 0.000000000E+00 0.000000000E+00 0
CH1C NO1C 1.000000000E-03 0.000000000E+00 0.000000000E+00 0
C RESISTENCIAS AUXILIARES (GRUPO2)
C NO2A TPRA 1.000000000E-03 0.000000000E+00 0.000000000E+00 0
C NO2B TPRA 1.000000000E-03 0.000000000E+00 0.000000000E+00 0
C NO2C TPRC 1.000000000E-03 0.000000000E+00 0.000000000E+00 0
C
C TSECA NO3A 1.000000000E-03 0.000000000E+00 0.000000000E+00 0
C TSECB NO3B 1.000000000E-03 0.000000000E+00 0.000000000E+00 0
C TSECC NO3C 1.000000000E-03 0.000000000E+00 0.000000000E+00 0
C Chaves (incluindo de falta externa)
NO4A NT1A 1.000000000E-03 0.000000000E+00 0.000000000E+00 0
NO4B NT1B 1.000000000E-03 0.000000000E+00 0.000000000E+00 0
NO4C NT1C 1.000000000E-03 0.000000000E+00 0.000000000E+00 0
```

```

CH2A CH2AA 1.000000000E-03 0.000000000E+00 0.000000000E+00 0
CH2B CH2BB 1.000000000E-03 0.000000000E+00 0.000000000E+00 0
CH2C CH2CC 1.000000000E-03 0.000000000E+00 0.000000000E+00 0
C Capacitâncias para balanceamento do sistema 0
TPRA 5.000000000E-05 0
TPRB 5.000000000E-05 0
TPRC 5.000000000E-05 0
C dados referentes a carga 0
CHGA 16.300E+00 18.29811000E+00 0.000000000E+00 0
CHGB 16.300E+00 18.29811000E+00 0.000000000E+00 0
CHGC 16.300E+00 18.29811000E+00 0.000000000E+00 0
C ligacao do ponto NEUT do transformador 0
NEUT NN1 1.000000000E-03 0.000000000E+00 0.000000000E+00 0
NN1 1.
$VINTAGE, 0
C dados referentes ao equivalente de geracao, em valores de sequencia
51FONTA G1A 7.5962 115.4500000 0
52FONTB G1B 7.1003 53.99000000 0
53FONTC G1C
C dados referentes a linha de transmissao com parametros concentrados
51CH2A LTNA 0.7186 11.45000+00 0
52CH2B LTNB .31010 2.41000E+00 0
53CH2C LTNC
$VINTAGE, 1
C TC do lado primario do transformador principal
TRANSFORMER 4.2E-36.0E-2TC1A
C <++++> Cards punched by support routine on 04-Aug-98 01.01.12 <++++>
C SATURATION
C 60.0 1.00E-035.00E-06 0
C 0.6000000000E-03 16.00
C 1.6000000000E-03 61.00
C 3.0000000000E-03 146.00
C 4.0000000000E-03 204.00
C 6.2000000000E-03 253.00
C 10.000000000E-03 272.00
C 20.000000000E-03 283.00
C 40.000000000E-03 290.00
C 100.00000000E-03 299.00
C 200.00000000E-03 306.00
C 1000.0000000E-03 319.00
C 2000.0000000E-03 323.00
C 9999
4.24264069E-03 6.00210877E-02
1.07873642E-02 2.28830397E-01
2.01140252E-02 5.47692426E-01
2.75940636E-02 7.65268869E-01
5.12761747E-02 9.49083450E-01
1.07894161E-01 1.02035849E+00
2.69933174E-01 1.06162299E+00
6.04456480E-01 1.08788222E+00
1.49507208E+00 1.12164408E+00
3.04682714E+00 1.14790330E+00
1.50921202E+01 1.19667044E+00
3.59800523E+01 1.21167571E+00
9999
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
1TCAP 0.85 .1 200.
2NO2A TPRA .0001 .1 5.
C FASE B DO TC PRIMARIO TC1B
TRANSFORMER TC1A
1TCBP
2NO2B TPRB
C FASE C DO TC PRIMARIO TC1C
TRANSFORMER TC1A
1TCCP
2NO2C TPRC
C IMPEDANCIA NO SECUNDARIO DO TC do lado PRIMARIO do trafo principal
TCAP CHAP 50.00
TCBP CHBP 50.00
TCCP CHCP 50.00
C TC DO SECUNDARIO DO TRAF0 PRINCIPAL
TRANSFORMER 4.2E-36.0E-2TC2A
C <++++> Cards punched by support routine on 04-Aug-98 01.01.12 <++++>
C SATURATION
C 60.0 1.00E-035.00E-06 0
C 0.6000000000E-03 16.00
C 1.6000000000E-03 61.00
C 3.0000000000E-03 146.00
C 4.0000000000E-03 204.00
C 6.2000000000E-03 253.00
C 10.000000000E-03 272.00
C 20.000000000E-03 283.00
C 40.000000000E-03 290.00
C 100.00000000E-03 299.00
C 200.00000000E-03 306.00
C 1000.0000000E-03 319.00
C 2000.0000000E-03 323.00
C 9999
4.24264069E-03 6.00210877E-02
1.07873642E-02 2.28830397E-01

```

```

2.01140252E-02 5.47692426E-01
2.75940636E-02 7.65268869E-01
5.12761747E-02 9.49083450E-01
1.07894161E-01 1.02035849E+00
2.69933174E-01 1.06162299E+00
6.04456480E-01 1.08788222E+00
1.49507208E+00 1.12164408E+00
3.04682714E+00 1.14790330E+00
1.50921202E+01 1.19667044E+00
3.59800523E+01 1.21167571E+00
9999
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
1TCAS 0.85 .1 2000.
2TSECA NO3A .1 .1 5.
C FASE B DO TC SECUNDARIO
TRANSFORMER TC2A TC2B
1TCBS
2TSECB NO3B
C FASE C DO TC SECUNDARIO
TRANSFORMER TC2A TC2C
1TCCS
2TSECC NO3C
C IMPEDANCIA NO SECUNDARIO DO TC do lado secundario do trafo principal
TCAS CHAS 50.00 0
TCBS CHBS 50.00 0
TCCS CHCS 50.00 0
C dados referentes ao transformador PRINCIPAL
C primeiro transformador
TRANSFORMER 3.019326.899T1 63000.
C <++++> Cards punched by support routine on 14-Oct-97 11.54.14 <++++>
C SATURATION
C 60.0 7.9674338.333333 0
C 0.7170000000E-03 0.90
C 1.4506200000E-03 1.00
C 7.9786000000E-03 1.10
C 41.1129000000E-03 1.15
C 113.77700000E-03 1.18
9999
1.06055811E+00 2.68995372E+01
3.28814356E+00 2.98883747E+01
2.08489263E+01 3.28772122E+01
1.29055289E+02 3.43716309E+01
3.80764491E+02 3.52682821E+01
9999
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
1TSECA NEUT .0175 1.514 7.967
2TPRA N10A .104789.083 13.80
3N10A N20A .4191136.33 55.20
4N20A N30A .4191136.33 55.20
5N30A TPRB .104789.083 13.80
C segundo transformador
TRANSFORMER T1 T2
1TSECB NEUT
2TPRB N10B
3N10B N20B
4N20B N30B
5N30B TPRC
C terceiro transformador
TRANSFORMER T1 T3
1TSECC NEUT
2TPRC N10C
3N10C N20C
4N20C N30C
5N30C TPRA
C final da descricao do transformador
BLANK card terminating network
C dados referentes as chaves do sistema eletrico
G1A CH1A -1.00E-01 1.000E+02 0.000E+00 0
G1B CH1B -1.00E-01 1.000E+02 0.000E+00 0
G1C CH1C -1.00E-01 1.000E+02 0.000E+00 0
C
13NO1A NO2A CLOSED RELE 0
13NO1B NO2B CLOSED RELE 0
13NO1C NO2C CLOSED RELE 0
C
13NO3A NO4A CLOSED RELE 0
13NO3B NO4B CLOSED RELE 0
13NO3C NO4C CLOSED RELE 0
C
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
NT1A CH2A -1.00E+00 1.000E+02 0.000E+00 0
NT1B CH2B -1.00E+00 1.000E+02 0.000E+00 0
NT1C CH2C -1.00E+00 1.000E+02 0.000E+00 0
LTNA CHGA -1.00E+00 1.000E+02 0.000E+00 0
LTNB CHGB -1.00E+00 1.000E+02 0.000E+00 0
LTNC CHGC -1.00E+00 1.000E+02 0.000E+00 0
C Chaves referentes a ligacao dos taps do transformador a terra
C N10A .10E-01 1.000E+02 0.000E+00 0
C N50A .10E-01 1.000E+02 0.000E+00 0
C N90A .10E-01 1.000E+02 0.000E+00 0

```

C N10B	.10E-01 1.000E+02 0.000E+00		0
C N50B	.10E-01 1.000E+02 0.000E+00		0
C N90B	.10E-01 1.000E+02 0.000E+00		0
C N10C	.10E-01 1.000E+02 0.000E+00		0
C N50C	.10E-01 1.000E+02 0.000E+00		0
C N90C	.10E-01 1.000E+02 0.000E+00		0
C Chaves referentes aos curtos entre espiras acionada a 10% no exemplo.			
C TPRA N10A	.00E-01 1.000E+02 0.000E+00		0
C N10A N50A	.10E-01 1.000E+02 0.000E+00		0
C N50A N90A	.10E-01 1.000E+02 0.000E+00		0
C TPRB N10B	.00E-01 1.000E+02 0.000E+00		0
C N10A N50B	.10E-01 1.000E+02 0.000E+00		0
C N50A N90B	.10E-01 1.000E+02 0.000E+00		0
C TPRC N10C	.00E-01 1.000E+02 0.000E+00		0
C N10C N50C	.10E-01 1.000E+02 0.000E+00		0
C N50C N90C	.10E-01 1.000E+02 0.000E+00		0
C Chaves para simular falta externa			
C CH2AA	.10E-01 1.000E+02 0.000E+00		0
C CH2BB	.10E-01 1.000E+02 0.000E+00		0
C CH2CC	.10E-01 1.000E+02 0.000E+00		0
C CHAVE DE MEDICAO PARA PASSAR SINAL PARA TACS			
C TC do primario do trafo principal			
CHAP	MEASURING		0
CHBP	MEASURING		0
CHCP	MEASURING		0
C TC do secundario do trafo principal			
CHAS	MEASURING		0
CHBS	MEASURING		0
CHCS	MEASURING		0
BLANK card terminating switches			
C dados referentes ao gerador			
14FONTA 0 112.7E+03 6.000E+01 0.000E+00	0	-1.000E+00 1.000E+02	
14FONTB 0 112.7E+03 6.000E+01-1.200E+02	0	-1.000E+00 1.000E+02	
14FONTC 0 112.7E+03 6.000E+01 1.200E+02	0	-1.000E+00 1.000E+02	
BLANK card terminating sources			
C CH1A CH1B CH1C NT1A NT1B NT1C			
BLANK card terminating outputs			
BLANK card terminating plots			
BEGIN NEW DATA CASE			

APÊNDICE II

Listagem do algoritmo e do programa utilizado no Matlab® para discriminar entre energização e falta em transformadores, utilizando a *Transformada Discreta de Fourier*. Após a leitura da seqüência de dados, o programa detecta a variação do valor da corrente diferencial, então é aberta uma janela com 1 ciclo de dados e efetuado o cálculo da *Transformada Discreta de Fourier*. É realizada uma comparação entre a 2ª harmônica do sinal e uma percentagem da fundamental, escolhida pelo usuário. Este programa lê todos os dados de uma listagem de arquivos contida em um arquivo, efetua a detecção e análise da Transformada Discreta, determina a ocorrência de falta ou não e cria um arquivo de imagem com os dados e o resultado, além de fornecer a comparação entre o resultado esperado e o obtido.

ALGORITMO:

Inicialização dos parâmetros;

Leitura do arquivo de dados;

|Se Corrente Diferencial| > k e |Corrente Diferencial| > |Média da Soma das Correntes| (A, B ou C)

Início

Para N ← 1 até 2ª dados/ciclos (onde n=5,6,7,...)

Guardar dados das Correntes Diferenciais;

Normalização dos Dados da Corrente Diferencial;

Calcular a TDF;

Se a 2ª harmônica > X% da fundamental

DETECTADO ENERGIZAÇÃO

Senão

DETECTADO FALTA

Fim

Senão ler próximos valores de Corrente Diferencial

Fim.

Programa do Matlab®:

```
% Discriminacao entre energizacao e falta interna, utilizando a segunda
% harmonica da Transformada Discreta de Fourier.
% autor: David Calhau Jorge - 2003
clear;
disp('-----');
gerabmp=0; % Geracao de arquivo BMP 0=nao 1=sim.
numeroenergiza=0;
numeroafalta=0;
erroenergiza=0;
erroafalta=0;
naosensibilizado=0;
% Abertura de todos os dados
arqdados=fopen('MATLAB.LST','rt');
a=1;
n=10323; % Numero de dados presentes no arquivo.
while a<=513 % Numero de simulacoes existentes.
    entrada=fgetl(arqdados);
    extensao='.OUT';
    entradadados=strcat(entrada,extensao);
    dados=fopen(entradadados,'r');
    data=fscanf(dados,'%g %g %g %g %g %g %g\n',[7,10323]);
    data=data';
    fclose(dados);

    % Rotina de deteccao e separacao dos dados pos falta.
    %inclinacao do sensor do rele
    ilimite=0.5;
    incl=0.3*0.3;
    i=1; resp=0; efalta=0;
    while (resp==0) & (i<=n)
        if ( data(i,2) >=ilimite & data(i,2)>abs(incl.*data(i,5)) ) | ( data(i,3)>=ilimite &
            data(i,3)>abs(incl.*data(i,6)) ) | ( data(i,4)>=ilimite &
            data(i,4)>abs(incl.*data(i,7)) )
            efalta=efalta+1;
        end;
        if efalta==3
            dadosaler=256;
            for j=1:dadosaler
                cfa(1,j)=data (8*j+i,2);
                cfb(1,j)=data (8*j+i,3);
                cfc(1,j)=data (8*j+i,4); resp=1;
            end;
            end;
            i=i+8;
        end;
        if resp==0
            num_ciclo=num2str(a);
            naosensibilizado=naosensibilizado+1;
            mostra_situacao=strcat(num_ciclo,'/513 ',entrada,'***** Rel0 no sensibilizado');
            diag01=strcat('Faltas:',num2str(numeroafalta),' ERROS:',num2str(erroafalta));
            diag02=strcat('Energizacoes:',num2str(numeroenergiza),'
            ERROS:',num2str(erroenergiza));
            diag03=strcat('Rele Nao Sensibilizado:',num2str(naosensibilizado));
            disp(mostra_situacao);
            disp(diag01);
            disp(diag02);
            disp(diag03);
            disp('-----');
        else
            % Numero de ciclos a serem analisados
            ciclosausar=1; % ciclo inteiro=1
            xx=size(cfa);
            yy=xx(1,2)*ciclosausar;
```

```

    dadosanalizados=yy;
    cfa=cfa(1,1:yy);
    cfb=cfb(1,1:yy);
    cfc=cfc(1,1:yy);
    [temp dadosanalizados]=size(cfa);
% Normaliza o dos dados
    xxa=max(abs(cfa));
    xxb=max(abs(cfb));
    xxc=max(abs(cfc));
    cfa=cfa./xxa;
    cfb=cfb./xxb;
    cfc=cfc./xxc;
% Calculo da Transformada Discreta de Fourier de 1 ciclo (FFT).
    ciclofft=1;
    dadosfft=256*ciclofft;
    fs=dadosfft/(1/60); % Frequencia do Sinal analisado.
    Ya=fft(cfa(1:dadosfft),dadosfft);
    Yb=fft(cfb(1:dadosfft),dadosfft);
    Yc=fft(cfc(1:dadosfft),dadosfft);
    Ya=Ya/length(Ya);
    Yb=Yb/length(Yb);
    Yc=Yc/length(Yc);
    Ya=fftshift(Ya);
    Yb=fftshift(Yb);
    Yc=fftshift(Yc);
    RYa=abs(Ya);
    RYb=abs(Yb);
    RYc=abs(Yc);
    k=(-1*(dadosfft/2)):(dadosfft/2-1)*fs/dadosfft;
    x0=(dadosfft/2)+1; xn=(dadosfft/2)+6;

% Deteccao da FFT se a segunda harmonica for 25% da primeira e considerada
energizacao
    atua=0;
    if RYa((dadosfft/2)+3) > 0.30*RYa((dadosfft/2)+2)
        respostaa='Detectado Energizacao';
    else respostaa='Detectado Falta';
    atua=1;
    end;

    if RYb((dadosfft/2)+3) > 0.30*RYb((dadosfft/2)+2)
        respostab='Detectado Energizacao';
    else respostab='Detectado Falta';
    atua=1;
    end;

    if RYc((dadosfft/2)+3) > 0.30*RYc((dadosfft/2)+2)
        respostac='Detectado Energizacao';
    else respostac='Detectado Falta';
    atua=1;
    end;

% Desenho do grafico obtido com o resultado da deteccao.
    tituloa=strcat('Sinal Original Idifa - ',respostaa);
    subplot(2,1,1); plot(cfa); title(tituloa);
    grid on; xlabel('Amostra','FontSize',16);
    subplot(2,1,2); bar(k(x0:xn),RYa(x0:xn),0.5); title('DFT');
    grid on; xlabel('Freq. [Hz]','FontSize',16); ylabel('Magnitude','FontSize',16);
    extensao='A.BMP';
    if gerabmp==1 grafico=strcat(entrada,extensao); else grafico='temp.bmp'; end;
    print ('-dbmp256',grafico);

    titulob=strcat('Sinal Original Idifb - ',respostab);
    subplot(2,1,1); plot(cfb); title(titulob);
    grid on; xlabel('Amostra','FontSize',16);
    subplot(2,1,2); bar(k(x0:xn),RYb(x0:xn),0.5); title('DFT');
    grid on; xlabel('Freq. [Hz]','FontSize',16); ylabel('Magnitude','FontSize',16);
    extensao='B.BMP';
    if gerabmp==1 grafico=strcat(entrada,extensao); else grafico='temp.bmp'; end;
    print ('-dbmp256',grafico);

    tituloc=strcat('Sinal Original Idifc - ',respostac);
    subplot(2,1,1); plot(cfc); title(tituloc);
    grid on; xlabel('Amostra','FontSize',16);
    subplot(2,1,2); bar(k(x0:xn),RYc(x0:xn),0.5); title('DFT');
    grid on; xlabel('Freq. [Hz]','FontSize',16); ylabel('Magnitude','FontSize',16);
    extensao='C.BMP';
    if gerabmp==1 grafico=strcat(entrada,extensao); else grafico='temp.bmp'; end;
    print ('-dbmp256',grafico);

% Verifica os erros nas respostas.
    tipodeentrada=entrada(1:5);
    if (tipodeentrada=='ENERG')
        numeroenergiza=numeroenergiza+1;
    else
        numerofaltas=numerofaltas+1;
    end;

```

```
if (atua==1) & (tipodeentrada=='ENERG')
erroenergiza=erroenergiza+1;
end;
if (atua==0) & (tipodeentrada=='FALTA')
errofalta=errofalta+1;
end;

% Incremento do contador de curvas e saida de situacoes.
num_ciclo=num2str(a); mostra_situacao=strcat(num_ciclo,'/513-',entrada);
diag01=strcat('Faltas:',num2str(merofalta),'      ERROS:',num2str(errofalta));
diag02=strcat('Energizacoes:',num2str(meroenergiza),'
ERROS:',num2str(erroenergiza));
diag03=strcat('Rele Nao Sensibilizado:',num2str(naosensibilizado));
disp(mostra_situacao);
disp(diag01);
disp(diag02);
disp(diag03);
linha=strcat('-----
-');
disp(linha);
end;
a=a+1;
end;
```

APÊNDICE III

Listagem do algoritmo e do programa utilizado no Matlab® para discriminar situações de energização e falta em transformadores, utilizando a Transformada Discreta Wavelet. Após a leitura da sequência de dados, o programa detecta a variação do valor da corrente diferencial, então é aberta uma janela com a quantidade de dados definida pelo usuário (1, ½, ¼ de ciclo) e efetua o cálculo da TDW. É observado então a quantidade de dados da decomposição D1 da TDW que excede o limiar, se esta quantidade exceder uma percentagem estipulada pelo usuário é identificada a situação de energização. Este programa lê todos os dados de uma listagem de arquivos contida em um arquivo, efetua a detecção e análise da TDW, determina a ocorrência de falta ou não e cria um arquivo de imagem com os dados e o resultado, além de fornecer a comparação entre o resultado esperado e o obtido.

ALGORITMO:

Inicialização dos parâmetros;

Leitura do arquivo de dados;

|Se Corrente Diferencial| > k e |Corrente Diferencial| > |Média da Soma das Correntes| (A, B ou C)

Início

Para N ← 1 até 2ⁿ dados/ciclos (onde n=5,6,7,...)

Guardar dados das Correntes Diferenciais;

Normalização dos Dados da Corrente Diferencial;

Calcular a TDW (Daubechies 4);

Para $N \leftarrow 1$ até 2^n dados/ciclos (onde $n=5,6,7,\dots$)

Se DI da TDW > limiar

energização $\leftarrow$ energização + 1;

Se energização > %dados acima do treshold

DETECTADO ENERGIZAÇÃO

Senão

DETECTADO FALTA

Fim

Senão ler próximos valores de Corrente Diferencial

Fim.

Programa do Matlab®:

```
% Discriminacao entre energizacao e falta interna em transformadores
% Utilizando a Transformada Discreta Wavelet
% Autor: David Calhau Jorge - 2003
clear;
disp('*****');

% GERA ARQUIVOS Post Script DOS GRAFICOS? 1=sim 0=nao
geraps=1;

% INICIALIZACAO DAS VARIAVEIS PARA CONTAR AS SIMULACOES E OS DIAGNOSTICOS
numeroenergiza=0;
numerofalta=0;
numerofaltaexterna=0;
erroenergiza=0;
errofalta=0;
errofaltaexterna=0;
naosensibilizado=0;

% ABERTURA DOS ARQUIVOS LISTADOS EM "MATLAB.LST" COMO VARIÁVEL "data"
arqdados=fopen('MATLAB.LST','rt');
a=1; % Contador do numero de simulacoes a serem realizadas.
n=10323; % Numero de dados presentes no arquivo.
while a<=513 % Limite com o numero de simulacoes existentes.
    entrada=fgetl(arqdados);
    extensao='.OUT';
    entradadados=strcat(entrada,extensao);
    dados=fopen(entradadados,'r');
    data=fscanf(dados,'%g %g %g %g %g %g %g %g \n',[7,10323]);
    data=data';
    fclose(dados);

% ROTINA DE DETECCAO E SEPARACAO DOS DADOS DE POS-FALTA.
    ilimite=0.5; % Minima corrente diferencial p/ sensibilizar o rele.
    incl=0.3*0.3; % Inclinação da curva do rele.
    i=1; % Numeros de dados a serem inicialmente desprezados
    resp=0; % Resposta da ocorrencia de falta: sim=1 nao=0
    efalta=0; % Inicializacao da variavel contadora do detector de falta
    while (resp==0) & (i<=n)
        % Deteccao com logica do rele percentual, cada deteccao incrementa o contador
        % da variavel "efalta".
        if ( data(i,2) >=ilimite & abs(data(i,2))>abs(incl.*data(i,5)) ) | (
            data(i,3)>=ilimite & abs(data(i,3))>abs(incl.*data(i,6)) ) | ( data(i,4)>=ilimite &
            abs(data(i,4))>abs(incl.*data(i,7)) )
            efalta=efalta+1;
        end;
        % Leitura de dados de falta se o rele percentual for sensibilizado o numero de
        % vezes estipulado com a variavel "efalta"
        if efalta==3
            dadosaler=256;
            for j=1:dadosaler
```



```

        cfA(1,j)=data(8*j+i,2);
        cfB(1,j)=data(8*j+i,3);
        cfC(1,j)=data(8*j+i,4); resp=1;
    end;
end;
i=i+8; % Incremento para leitura do proximo dado (reamostrado)
end;

% SAIDA NA TELA DE SITUAÇÃO DE NÃO SENSIBILIZAÇÃO DO RELE
if resp==0
    num_ciclo=num2str(a);
    naosensibilizado=naosensibilizado+1;
    diag01=strcat('Faltas:',num2str(merofalta),' ERROS:',num2str(errofalta));
    diag02=strcat('Energizações:',num2str(meroenergiza),' ERROS:',num2str(erroenergiza));
    diag03=strcat('Rele Não Sensibilizado:',num2str(naosensibilizado));
    num_ciclo=num2str(a); mostra_situacao=strcat(num_ciclo,'/513 -',entrada);
    disp(mostra_situacao);
    disp(diag01);
    disp(diag02);
    disp(diag03);
    disp('*****');
else
    % DEFINIÇÃO DO NÚMERO DE CICLOS A SEREM ANALISADOS E DO THRESHOLD
    limite=0.70; % percentagem do limiar que determina situação de falta
    ciclosausar=0.25; % um ciclo inteiro equivale a: ciclosausar=1
    nivel=1E-04; % nível do limiar

    % OBTENÇÃO DAS AMOSTRAS DE POS-FALTA
    xx=size(cfA);
    yy=xx(1,2)*ciclosausar;
    dadosanalizados=floor(dadosaler*ciclosausar);
    cfA=cfA(1,1:yy);
    cfB=cfB(1,1:yy);
    cfC=cfC(1,1:yy);
    [temp dadosanalizados]=size(cfA);

    % NORMALIZAÇÃO DOS DADOS DE POS-FALTA
    xx=max(abs(cfA));
    cfA=cfA./xx;
    xx=max(abs(cfB));
    cfB=cfB./xx;
    xx=max(abs(cfC));
    cfC=cfC./xx;

    % CÁLCULO DA TRANSFORMADA DISCRETA DE WAVELETS - Daubechies 4 em 4 níveis
    % PARA AS TRÊS CORRENTES DIFERENCIAIS
    [C,L]=wavedec(cfA,4,'db4');
    % Obtenção dos valores da decomposição.
    CA4=appcoef(C,L,'db4',4); A4=wrcoef('a',C,L,'db4',4);
    CA3=appcoef(C,L,'db4',3); A3=wrcoef('a',C,L,'db4',3);
    CA2=appcoef(C,L,'db4',2); A2=wrcoef('a',C,L,'db4',2);
    CA1=appcoef(C,L,'db4',1); A1=wrcoef('a',C,L,'db4',1);
    CD4=detcoef(C,L,4); D4=wrcoef('d',C,L,'db4',4);
    CD3=detcoef(C,L,3); D3=wrcoef('d',C,L,'db4',3);
    CD2=detcoef(C,L,2); D2=wrcoef('d',C,L,'db4',2);
    CD1=detcoef(C,L,1); D1=wrcoef('d',C,L,'db4',1);

    % DISCRIMINAÇÃO ENTRE ENERGIZAÇÃO E FALTA, SEGUNDO AS VARIÁVEIS DEFINIDAS
    % ANTERIORMENTE.

    % Análise da Idifa.

    % Cálculo da Transformada Discreta de Fourier Daubechies 2 em 4 níveis.

    detecta=0;
    atua=0;

    for j=1:dadosanalizados
        if abs(D1(j))>nivel detecta=detecta+1;
    end;
end;
if detecta>(abs(limite*dadosanalizados)) deteccaoA='-detectado:Energizacao';
else deteccaoA='-detectado:Falta'; atua=1;
end;
resposta=strcat('Idif A ',detcacaoA);

% Desenho em arquivo das curvas e da deteccao.
subplot(3,3,1); plot(cfA); title(resposta);
subplot(3,3,2); plot(A1); title('A1 -db 4');
subplot(3,3,3); plot(D1); resposta=strcat(resposta,' D1-db4'); title(resposta);
subplot(3,3,4); plot(A2); title('A2 -db 4');
subplot(3,3,5); plot(D2); title('D2 -db 4');
subplot(3,3,6); plot(A3); title('A3 -db 4');
subplot(3,3,7); plot(D3); title('D3 -db 4');

```

```

subplot(3,3,8); plot(A4); title('A4 -db 4');
subplot(3,3,9); plot(D4); title('D4 -db 4');

extensao='A.ps';
if geraps==1 grafico=strcat(entrada,extensao); else grafico='temp.ps'; end;
print ('-dps',grafico);

% Analise da IdifB.

% Calculo da Transformada Discreta de Fourier Daubechies 2 em 4 niveis.
[C,L]=wavedec(cfB,4,'db4');
% Obtencao dos valores da decomposicao.
CA4=appcoef(C,L,'db4',4); A4=wrcoef('a',C,L,'db4',4);
CA3=appcoef(C,L,'db4',3); A3=wrcoef('a',C,L,'db4',3);
CA2=appcoef(C,L,'db4',2); A2=wrcoef('a',C,L,'db4',2);
CA1=appcoef(C,L,'db4',1); A1=wrcoef('a',C,L,'db4',1);
CD4=detcoef(C,L,4); D4=wrcoef('d',C,L,'db4',4);
CD3=detcoef(C,L,3); D3=wrcoef('d',C,L,'db4',3);
CD2=detcoef(C,L,2); D2=wrcoef('d',C,L,'db4',2);
CD1=detcoef(C,L,1); D1=wrcoef('d',C,L,'db4',1);

% DISCRIMINACAO ENTRE ENERGIZACAO E FALTA, SEGUNDO AS VARIAVEIS DEFINIDAS
% ANTERIORMENTE.
detecta=0;
for j=1:dadosanalizados
    if abs(D1(j))>nivel detecta=detecta+1;
end;
end;
if detecta>(abs(limite*dadosanalizados)) deteccaoB='-detectado:Energizacao';
else deteccaoB='-detectado:Falta'; atua=1;
end;
resposta=strcat('Idif B ',detcacaoB);

% Desenho em arquivo das curvas e da deteccao.
subplot(3,3,1); plot(cfB); title(resposta);
subplot(3,3,2); plot(A1); title('A1 -db 4');
subplot(3,3,3); plot(D1); resposta=strcat(resposta,' D1-db4'); title(resposta);
subplot(3,3,4); plot(A2); title('A2 -db 4');
subplot(3,3,5); plot(D2); title('D2 -db 4');
subplot(3,3,6); plot(A3); title('A3 -db 4');
subplot(3,3,7); plot(D3); title('D3 -db 4');
subplot(3,3,8); plot(A4); title('A4 -db 4');
subplot(3,3,9); plot(D4); title('D4 -db 4');

extensao='B.ps';
if geraps==1 grafico=strcat(entrada,extensao); else grafico='temp.ps'; end;
print ('-dps',grafico);

% Analise da IdifC.
% Calculo da Transformada Discreta de Fourier Daubechies 2 em 4 niveis.
[C,L]=wavedec(cfC,4,'db4');
% Obtencao dos valores da decomposicao.
CA4=appcoef(C,L,'db4',4); A4=wrcoef('a',C,L,'db4',4);
CA3=appcoef(C,L,'db4',3); A3=wrcoef('a',C,L,'db4',3);
CA2=appcoef(C,L,'db4',2); A2=wrcoef('a',C,L,'db4',2);
CA1=appcoef(C,L,'db4',1); A1=wrcoef('a',C,L,'db4',1);
CD4=detcoef(C,L,4); D4=wrcoef('d',C,L,'db4',4);
CD3=detcoef(C,L,3); D3=wrcoef('d',C,L,'db4',3);
CD2=detcoef(C,L,2); D2=wrcoef('d',C,L,'db4',2);
CD1=detcoef(C,L,1); D1=wrcoef('d',C,L,'db4',1);

% Deteccao da energizacao. Utilizado critério de incidencias acima de um deter-
% minado limite para o sinal D1.
detecta=0;
for j=1:dadosanalizados
    if abs(D1(j))>nivel detecta=detecta+1;
end;
end;
if detecta>(abs(limite*dadosanalizados)) deteccaoC='-detectado:Energizacao';
else deteccaoC='-detectado:Falta'; atua=1;
end;
resposta=strcat('Idif C ',detcacaoC);

% DESENHO DAS CURVAS E DA RESPOSTA DA DETECAO.
subplot(3,3,1); plot(cfC); title(resposta);
subplot(3,3,2); plot(A1); title('A1 -db 4');
subplot(3,3,3); plot(D1); resposta=strcat(resposta,' D1-db4'); title(resposta);
subplot(3,3,4); plot(A2); title('A2 -db 4');
subplot(3,3,5); plot(D2); title('D2 -db 4');
subplot(3,3,6); plot(A3); title('A3 -db 4');
subplot(3,3,7); plot(D3); title('D3 -db 4');
subplot(3,3,8); plot(A4); title('A4 -db 4');
subplot(3,3,9); plot(D4); title('D4 -db 4');

extensao='C.ps';
if geraps==1 grafico=strcat(entrada,extensao); else grafico='temp.ps'; end;

```

```
print ('-dps',grafico);

% VERIFICACAO DOS ERROS NAS RESPOSTAS SEGUNDO O NOME DO ARQUIVO DE ORIGEM.
tipodeentrada=entrada(1:5);
if (tipodeentrada=='ENERG')
    numeroenergiza=numeroenergiza+1;
else
    numerofalta=numerofalta+1;
end;

if (atua==1) & (tipodeentrada=='ENERG')
    erroenergiza=erroenergiza+1;
end;

if (atua==0) & (tipodeentrada=='FALTA')
    errofalta=errofalta+1;
end;

% INCREMENTO DO CONTADOR E MOSTRA O ARQUIVO ATUALMENTE ANALISADO.
diag01=strcat('Faltas:',num2str(numerofalta),' ERROS:',num2str(errofalta));
diag02=strcat('Energizacoes:',num2str(numeroenergiza),'
ERROS:',num2str(erroenergiza));
diag03=strcat('Rele Nao Sensibilizado:',num2str(naosensibilizado));
num_ciclo=num2str(a); mostra_situacao=strcat(num_ciclo,'/513 -',entrada);
disp(mostra_situacao);
disp(diag01);
disp(diag02);
disp(diag03);

disp('*****');
end;
    a=a+1;
end;
```

APÊNDICE IV

A seguir é apresentado o programa principal, utilizado para realizar os treinamentos com as RNAs. Este é um dos exemplos das diversas simulações realizadas, sendo necessário a mudança de alguns parâmetros para ajustá-lo a outras arquiteturas da RNA ou condições desenvolvidas neste estudo.

Programa do Matlab®:

```
% Redes Neurais Artificiais associadas a TDW para
% discriminacao entre energizacao e falta interna
% Autor: David Calhau Jorge - 2003

% Inicializacao de Variaveis
%=====

clear all;
clf
set (0,'DefaultAxesFontSize',16);
hold off
axis('square')
pause(1);

% Leitura dos dados para Treinamento
%=====
load t.dat

% Inicializacao da Arquitetura da Rede
%=====

% Ajusta o vetor de tamanho R e as camadas S1,S2 e S3. S1,S2-->especificadas.
%=====

salvavar=strcat('RNA_',num2str(S1),'_',num2str(S2),'_1.run');
delete (salvavar);
diary (salvavar);

% Inicializacao dos pesos e ajustes (Nguyen-Widrow)
%=====
[W1,B1] = nwlog(S1,R);
[W2,B2] = nwlog(S2,S1);
[W3,B3] = nwlog(S3,S2);

% Treinamento da rede
%=====

% Parametros iniciais de Treinamento
disp_freq = 25;
max_epoch = 50000;
err_goal = 0.05;
lr = 0.5;
lr_inc = 1.5;
```

```

lr_dec = 0.5;
err_ratio = 1.04;
momentum = 0.5;

TP = [disp_freq max_epoch err_goal lr_lr_inc lr_dec momentum err_ratio];
[W1,B1,W2,B2,W3,B3,epoch,TR]=trainbpx(W1,B1,'logsig',W2,B2,'logsig',W3,B3,'logsig',P,
T,TP);

% Resultados Sumarizados
%=====

disp('***** Resultado das Simulacoes da RNA *****');
SSE = sumsq(T-logsig(W3*logsig(W2*logsig(W1*P,B1),B2),B3));
fprintf('\nValores Finais da Rede Neural:\n');
W1
B1
W2
B2
W3
B3
fprintf('Treinada para %.0f epochs.\n',epoch);
fprintf('O treinamento tomou %.0f flops.\n',flops);
fprintf('Erro medio quadratico de %g.\n',err_goal);
fprintf('Soma do erro quadratico final e %g.\n',SSE);
fprintf('A rede treinada operou: ');
if SSE < err_goal
    disp('Adequadamente.')
else
    disp('Inadequadamente.')
end
disp('*****');
%Comparacao de resultados
%=====

Y=logsig(W1*P2,B1);
X=logsig(W2*Y,B2);
Z=logsig(W3*X,B3);
Z=Z';
disp('***** Erro Absoluto Obtido nos Testes *****');
Erroabs=abs(Z-t);
[n temp]=size(Z);
cont2=0;
for cont=1:n
    if Erroabs(cont)>0.5
        cont2=cont2+1;
    end;
end;
fprintf('Numero de testes:%f Erros:%f ou %f%% \n',n,cont2,(cont2/n*100));
disp('*****');

%Salvando os resultados
%=====
diary off;
salvavar=strcat('RNA_',num2str(S1),'_',num2str(S2),'_1');
save (salvavar);
salvavar=strcat('RNA_',num2str(S1),'_',num2str(S2),'_1.ps');
print ('-deps', (salvavar));

% Fim do Programa de RNA e dos testes.
%=====

```

APÊNDICE V

Publicação deste trabalho:

Jorge, D. C.; Coury, D. V. – *Wavelet Transforms Applied to Differential Protection of Power Transformers* – XIV Congresso Brasileiro de Automática – Natal, 2002.