JÁDER FERNANDO DIAS BREDÁ

**Algoritmo híbrido e inteligente para o diagnóstico
das condições operativas de
transformadores de potência no contexto da
qualidade da energia elétrica**

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências, Programa de Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Sistemas Elétricos de Potência
Orientador: Prof. Dr. Mário Oleskovicz

São Carlos

2012

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTES
TRABALHOS, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO,
PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

B831a Breda, Jäder Fernando Dias
Algoritmo híbrido e inteligente para o diagnóstico das
condições operativas de transformadores de potência no
contexto da qualidade de energia elétrica / Jäder
Fernando Dias Breda ; orientador Mário Oleskovicz. -- São
Carlos, 2012.

Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação e
Área de Concentração em Engenharia Elétrica) -- Escola de
Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo,
2012.

1. Proteção digital de transformadores. 2. Energia
elétrica - qualidade. 3. Análise de ondaletas. 4. Lógica
Fuzzy. 5. Redes neurais. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **JÁDER FERNANDO DIAS BREDÁ**.

Título da dissertação: "Algoritmo híbrido e inteligente para o diagnóstico das condições operativas de transformadores de potência no contexto da qualidade da energia elétrica".

Data da defesa: 12/07/2012

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Dr. Mário Oleskovicz (Orientador)
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Aprovado

Prof. Dr. Ricardo Caneloi dos Santos
(Universidade Federal do ABC/UFABC)

Aprovado

Prof. Dr. Rogério Andrade Flauzino
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Aprovado

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica:
Prof. Titular Denis Vinícius Coury

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Titular Denis Vinícius Coury

DEDICATÓRIA

À minha mãe, Sueli, pelo seu amor verdadeiro, sempre querendo meu bem acima de tudo. E ao meu pai, Carlos, por ter sido meu maior incentivador e pelo exemplo de homem que me deixou.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por toda minha família e amigos, além da minha felicidade de viver.

A minha mãe, Sueli, pelo exemplo de amor, trabalho e dedicação dispensados em mais esta etapa da minha vida, e ao meu pai, Carlos, que tantas saudades deixou, mas que sempre será uma das minhas maiores fontes de incentivo para continuar.

Ao meu irmão, Juninho, por ter esse coração enorme e por todo o companheirismo nesta reta final do trabalho e a Bruna, pelo seu amor, carinho, incentivo e paciência nos momentos de dificuldade.

Ao professor Mário Oleskovicz, pela ótima orientação, atenção dispensada, apoio e incentivo na elaboração deste trabalho.

A todos os meus amigos da pós-graduação, em especial, a Hermes M. G. C. Branco e Daniel Barbosa, pelo auxílio concedido durante todo o trabalho.

Aos três “irmãos” que ganhei desde minha graduação, Alexandre, Luiz Henrique e Luís Paulo, por sempre estarem ao meu lado em todos os momentos.

Aos meus amigos de república, Epson, Yuri, Renan e, especialmente, Gabriel, pela contribuição fornecida na parte de programação deste trabalho.

Aos meus amigos de Ribeirão Preto, do Centro Cultural Boa Vista, que sempre me acolheram e nunca deixaram de orar por mim.

A todos os professores e funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica, que de algum modo colaboraram durante a minha pós-graduação nesta universidade.

Ao próprio Departamento de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) – Universidade de São Paulo (USP).

Ao Laboratório de Sistemas de Energia Elétrica – LSEE, pela participação e fornecimento de todas as condições necessárias para o desenvolvimento deste trabalho.

A Companhia Paulista de Força e Luz – CPFL, devido à parceria com o LSEE, pelo fornecimento dos dados que vieram a possibilitar e viabilizar esta pesquisa.

“Se não for na raça, não tem graça!”.

(Jáder F. D. Breda)

RESUMO

BREDA, J. F. D. **Algoritmo híbrido e inteligente para o diagnóstico das condições operativas de transformadores de potência no contexto da qualidade da energia elétrica**. 2012. 181f. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

Esta pesquisa teve como objetivo o desenvolvimento de um algoritmo computacional capaz de diagnosticar as condições operativas de transformadores de potência. As variáveis tomadas como base para classificar as condições apresentadas se referem às usualmente empregadas pela lógica de proteção diferencial, ou seja, a corrente diferencial e o conteúdo harmônico presente nos sinais em análise. Além disto, foi também verificada a relação entre alguns dos fenômenos associados à falta de qualidade da energia elétrica originados pelos consumidores conectados no secundário e refletidos ao primário do transformador. O algoritmo desenvolvido utilizou-se da Transformada *Wavelet* e de técnicas de inteligência artificial (Lógica *Fuzzy* e Redes Neurais Artificiais), com o objetivo de inferir sobre os relacionamentos supracitados. Todos os testes para validação da metodologia proposta foram realizados dispondo de um sistema elétrico simulado no *software* ATP (*Alternative Transients Program*). Os resultados encontrados denotam que, frente às condições analisadas, correntes diferenciais e conteúdo harmônico indesejado podem vir a surgir, fazendo com que a lógica implementada venha a diagnosticar erroneamente a condição de operação enfrentada. Os resultados avaliam ainda a propagação destas condições do secundário para o primário do transformador em análise.

Palavras-chave: Proteção digital de transformadores, Qualidade da energia elétrica, Transformada *Wavelet*, Lógica *Fuzzy* e Redes Neurais Artificiais.

ABSTRACT

BREDA, J. F. D. Hybrid intelligent algorithm for the diagnosis of operating conditions of power transformers in the context of power quality. 2012. 181f. Dissertation (Master Degree) – Engineering School of São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, 2012.

This research aimed to develop an algorithm able to diagnose the operating conditions of power transformers. The variables considered to classify the presented conditions were the normally used by differential protection logic, i.e., the differential current and the harmonic content in the signals in analysis. Moreover, the relationship between some phenomena associated to a poor power quality originated from consumers connected to the secondary and reflect to the primary side of the transformer was also verified. In order to infer the relationships above mentioned, the developed algorithm used the Wavelet Transform and artificial intelligence techniques (Fuzzy Logic and Artificial Neural Networks). All the tests applied to validate the proposed methodology were performed making use of the ATP (Alternative Transients Program). In face of the analyzed conditions, the results show that differential currents and undesired harmonic content can arise and the implemented logic will erroneously diagnose the operation condition addressed. The results also illustrate the propagation of these conditions from secondary to primary side of the analyzed transformer.

Keywords: Digital transformer protection, Power quality, Wavelet transformer, Fuzzy logic and Artificial neural networks.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	17
LISTA DE SIGLAS	21
1. INTRODUÇÃO	23
1.1 Objetivos	25
1.2 Organização do trabalho	26
2. CONCEITOS FUNDAMENTAIS E FERRAMENTAS CONSIDERADAS	27
2.1 A proteção diferencial de transformadores de potência	27
2.2 A qualidade da energia elétrica	32
2.3 A Transformada <i>Wavelet</i>	34
2.4 Lógica <i>Fuzzy</i>	45
2.5 Redes Neurais Artificiais	49
3. TRABALHOS RELACIONADOS À PESQUISA	55
3.1 Saturação dos TC	55
3.2 Energização sob carga	58
3.3 Classificação das condições operativas de transformadores de potência	60
3.4 Classificação de distúrbios associados à falta de QEE	63
4. O SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA	65
4.1 O Sistema elétrico analisado	65
4.2 Simulações computacionais	76
4.2.1 Condições de operação do transformador	77
4.2.1 Fenômenos de QEE	85
5. PROCEDIMENTOS E O ALGORITMO IMPLEMENTADO	97
5.1 Descrição metodológica	97
5.2 Tratamento do fenômeno da saturação dos TCs	99
5.3 O algoritmo de proteção e monitoramento proposto	104
5.4 Caso-exemplo	110

6. RESULTADOS DA CLASSIFICAÇÃO DAS OCORRÊNCIAS E DA REFLEXÃO PARA O ALIMENTADOR PRINCIPAL	115
6.1 Algoritmo de proteção e monitoramento	115
6.2 Correntes diferenciais originadas por distúrbios de QEE no secundário do transformador	126
6.3 Efeitos refletidos para o lado primário devido aos distúrbios de QEE aplicados no lado secundário do transformador	152
6.4 Avaliação do algoritmo de monitoramento frente à aplicação de distúrbios de QEE no lado secundário do transformador	161
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS	173
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	177

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - A proteção diferencial para transformadores. Fonte: (BRANCO, 2009).	27
Figura 2 - Análise da circulação de corrente. (a) Operação normal. (b) Falta interna.	28
Figura 3 - Curva característica da proteção diferencial.	30
Figura 4 - Dilatação de uma <i>wavelet</i> .	36
Figura 5 - Translação de uma <i>wavelet</i> .	37
Figura 6 - Formas básicas de algumas funções <i>wavelets</i> .	38
Figura 7 – Transformada <i>Wavelet</i> Discreta – AMR.	44
Figura 8 - Árvore de coeficientes quando da aplicação da TWP até o terceiro nível.	45
Figura 9 - Funções de pertinência.	46
Figura 10 - Sistema de Inferência <i>Fuzzy</i> .	47
Figura 11 - Modelo matemático de um neurônio artificial.	50
Figura 12 - Sistema elétrico simulado.	67
Figura 13 - Modelo do transformador monofásico elevador.	68
Figura 14 - Detalhes das conexões dos enrolamentos.	68
Figura 15 - Curva de saturação ($V \times I$) do transformador de corrente.	69
Figura 16 - Alimentador de distribuição utilizado.	71
Figura 17 - Modelagem de um trecho do alimentador de distribuição.	74
Figura 18 - Modelagem de um consumidor conectado ao alimentador de distribuição.	75
Figura 19 - Modelagem de um banco de capacitor conectado ao alimentador de distribuição.	75
Figura 20 - Partições do enrolamento primário para situações de faltas internas.	78
Figura 21 - Trecho do arquivo ATP com as chaves utilizadas para a aplicação de faltas internas no primário do transformador TR1A.	79
Figura 22 - Corrente trifásica observada para uma falta interna aplicada ao secundário de TR1A entre as fases "A" e "B", com envolvimento de 5% do enrolamento e ângulo de incidência de 270°.	80
Figura 23 - Corrente trifásica observada para uma energização em vazio de TR1A com ângulo de incidência de 270°.	81
Figura 24 - Corrente trifásica observada para uma energização sob carga de TR1A com ângulo de incidência de 270°.	82

Figura 25 - Corrente trifásica observada para uma energização de TR1A com ângulo de incidência de 270° sob uma falta interna entre as fases "A" e "B", aplicada ao lado secundário do transformador e com 5% do enrolamento envolvido.	83
Figura 26 - Corrente trifásica observada para uma sobre-excitação de 170% do valor nominal da tensão de alimentação.	84
Figura 27 - Corrente trifásica observada para uma falta externa com ângulo de incidência de 270° , aplicada ao secundário do transformador TR1A.	85
Figura 28 - Locais de aplicação dos curtos-circuitos no alimentador de distribuição.	86
Figura 29 - Afundamento de tensão no secundário do transformador TR1A.	87
Figura 30 - Elevação de tensão no secundário do transformador TR1A.	88
Figura 31 - Desequilíbrio de tensão no secundário do transformador TR1A.	88
Figura 32 - Tensões trifásicas observadas no secundário do transformador de conexão do retificador.	89
Figura 33 - Tensões trifásicas observadas no primário do transformador de conexão do retificador.	90
Figura 34 - Tensões trifásicas observadas no secundário do transformador TR1A.	90
Figura 35 - Espectro de frequência das correntes no primário do transformador de conexão.	91
Figura 36 - Espectro de frequência das correntes no secundário do transformador de conexão.	92
Figura 37 - Tensões trifásicas observadas no secundário do transformador de conexão do FEA.	93
Figura 38 - Tensões trifásicas observadas no primário do transformador de conexão do FEA.	93
Figura 39 - Tensões trifásicas observadas no secundário do transformador TR1A.	94
Figura 40 - Espectro de frequência das correntes no primário do transformador de conexão.	95
Figura 41 - Espectro de frequência das correntes no secundário do transformador de conexão.	95
Figura 42 - Fluxograma do algoritmo completo implementado.	98
Figura 43 - Topologia da RNA detectora.	101
Figura 44 - Resposta da RNA detectora para um dos padrões de validação.	102
Figura 45 - Topologia da RNA corretora.	103
Figura 46 - Resposta da RNA corretora para um padrão de validação.	104
Figura 47 - Fluxograma do algoritmo de proteção e monitoramento proposto.	105
Figura 48 - Funções de pertinência.	107

Figura 49 - Correntes trifásicas em ambos os lados do transformador.	111
Figura 50 - Correntes trifásicas em ambos os lados do transformador após a correção da saturação.	111
Figura 51 - Correntes trifásicas diferenciais.	112
Figura 52 – Outras entradas do Sistema <i>Fuzzy</i> .	112
Figura 53 - Saída final do Sistema <i>Fuzzy</i> para o caso-exemplo.	113
Figura 54 - Tensões trifásicas em ambos os lados do transformador.	114
Figura 55 - Saída do algoritmo para uma situação de regime permanente.	117
Figura 56 - Saída do algoritmo para uma situação de sobre-excitação.	118
Figura 57 - Saída do algoritmo para uma situação de energização sob carga.	121
Figura 58 - Saída do algoritmo para uma situação de energização em vazio.	122
Figura 59 - Saída do algoritmo para uma situação de falta interna.	123
Figura 60 - Saída do algoritmo para uma situação de energização sob falta interna.	125
Figura 61 - Saída do algoritmo para um curto-circuito fase-terra franco aplicado em L_1 .	128
Figura 62 - Saída do algoritmo para um curto-circuito fase-terra franco aplicado em L_3 .	129
Figura 63 - Saída do algoritmo para um curto-circuito fase-terra franco aplicado em L_4 .	132
Figura 64 - Saída do algoritmo para um curto-circuito fase-terra, com resistência de falta de 40 Ohms, aplicado em L_1 .	133
Figura 65 - Saída do algoritmo para um curto-circuito fase-fase franco aplicado em L_1 .	136
Figura 66 - Saída do algoritmo para um curto-circuito fase-fase franco aplicado em L_3 .	137
Figura 67 - Saída do algoritmo para um curto-circuito fase-fase franco aplicado em L_4 .	138
Figura 68 - Saída do algoritmo para um curto-circuito fase-fase, com resistência de falta de 40 Ohms, aplicado em L_1 .	140
Figura 69 - Saída do algoritmo para um curto-circuito fase-fase-terra franco aplicado em L_1 .	141
Figura 70 - Saída do algoritmo para um curto-circuito fase-fase-terra franco aplicado em L_3 .	142
Figura 71 - Saída do algoritmo para um curto-circuito fase-fase-terra franco aplicado em L_4 .	143
Figura 72 - Saída do algoritmo para um curto-circuito fase-fase-terra, com resistência de falta de 40 Ohms, aplicado em L_1 .	144
Figura 73 - Saída do algoritmo para um curto-circuito trifásico franco aplicado em L_1 .	145
Figura 74 - Saída do algoritmo para um curto-circuito trifásico franco aplicado em L_3 .	146
Figura 75 - Saída do algoritmo para um curto-circuito trifásico franco aplicado em L_4 .	147

Figura 76 - Saída do algoritmo para um curto-circuito trifásico com resistência de falta de 40 Ohms aplicado em L_1 .	148
Figura 77 - Saída do algoritmo com a inserção do retificador em L_1 .	150
Figura 78 - Saída do algoritmo com a inserção do FEA em L_1 .	151
Figura 79 - Formas de onda das tensões e correntes trifásicas em ambos os lados do transformador observadas para um curto-circuito trifásico franco aplicado em L_1 .	153
Figura 80 - Espectro de frequência da tensão no secundário do transformador do retificador.	157
Figura 81 - Espectro de frequência da tensão no primário do transformador do retificador.	157
Figura 82 - Correntes trifásicas observadas no primário do transformador de conexão do retificador.	158
Figura 83 - Correntes trifásicas observadas no secundário do transformador de conexão do retificador.	158
Figura 84 - Espectro de frequência da tensão no secundário do transformador do FEA.	159
Figura 85 - Espectro de frequência da tensão no primário do transformador do FEA.	160
Figura 86 - Correntes trifásicas observadas no primário do transformador de conexão do FEA.	160
Figura 87 - Correntes trifásicas observadas no primário do transformador de conexão do FEA.	161
Figura 88 - Saída do algoritmo para uma situação de sobre-excitação do transformador com um curto-circuito fase-terra franco aplicado em L_1 .	163
Figura 89 - Saída do algoritmo para uma situação de sobre-excitação do transformador com um curto-circuito fase-terra franco aplicado em L_4 .	165
Figura 90 - Saída do algoritmo para uma situação de energização sob carga do transformador com um curto-circuito fase-terra franco aplicado em L_1 .	168
Figura 91 - Saída do algoritmo para uma situação de energização sob carga do transformador com um curto-circuito fase-terra franco aplicado em L_2 .	169
Figura 92 - Saída do algoritmo para uma situação de falta interna do transformador com um curto-circuito fase-terra franco aplicado em L_1 .	170
Figura 93 - Saída do algoritmo para uma situação de falta interna do transformador com um curto-circuito fase-terra franco aplicado em L_4 .	172

LISTA DE SIGLAS

ATP – *Alternative Transients Program*

CA – Corrente Alternada

CC – Corrente Contínua

DHT – Distorção Harmônica Total

EMTP – *ElectroMagnetic Transients Program*

FEA – Forno Elétrico a Arco

IEEE – *Institute of Eletrical and Eletronics Engineers*

LF – Lógica *Fuzzy*

LSEE – Laboratório de Sistemas de Energia Elétrica

MIT – Motor de Indução Trifásico

QEE – Qualidade da Energia Elétrica

RNA – Redes Neurais Artificiais

SF – Sistema *Fuzzy*

SEP – Sistema Elétrico de Potência

TC – Transformador de Corrente

TP – Transformador de Potencial

TPC – Transformador de Potencial Capacitivo

TW – Transformada *Wavelet*

TWD – Transformada *Wavelet* Discreta

TWP – Transformada *Wavelet Packet*

1. INTRODUÇÃO

Tanto os sistemas de transmissão, como de distribuição, estão constantemente sujeitos as ocasionais variações de tensão e/ou corrente. Estas variações, mesmo dentro de limites pré-estabelecidos, podem causar operações incorretas de sensíveis equipamentos elétricos nos diversos setores do Sistema Elétrico de Potência (SEP). Para evitar danos ao sistema e aos consumidores, fica evidente a importância de se detectar o mais rápido possível o início de um distúrbio, e determinar a ação dos dispositivos de proteção que irão retornar o sistema à condição normal de operação. Além disto, torna-se importante também uma análise e diagnóstico da Qualidade da Energia Elétrica – QEE, no intuito de determinar as causas e as consequências dos distúrbios no sistema, além de apresentar medidas técnicas e economicamente viáveis para solucionar os problemas evidenciados.

Considerando tais fatores, cita-se como uma das principais razões para os estudos relacionados à proteção digital e à QEE, o valor econômico decorrente de operações não desejáveis. Como fato, tem-se que a atuação inadequada da proteção pode danificar os equipamentos da concessionária e dos consumidores, além de interromper indevidamente o fornecimento da energia (CANGUÇU, 2006), (MELO, 2008). Com o intuito de diminuir as perdas causadas tanto às concessionárias, quanto aos consumidores, vários estudos mostram novas técnicas que vêm sendo desenvolvidas para a detecção e a classificação de distúrbios sobre determinado sistema elétrico. No entanto, estes trabalhos se propõem a observar apenas as formas de onda da tensão quando o direcionamento é dado aos fenômenos de QEE (MESUT e JINSANG, 2006).

As concessionárias de energia têm como meta garantir a qualidade do serviço e assegurar uma vida razoável às instalações e equipamentos elétricos presentes em seus sistemas.

Entretanto, as mesmas se defrontam com perturbações e anomalias na operação que afetam as redes elétricas e seus equipamentos, caracterizando efeitos indesejáveis. Logo, além de atenuar e/ou extinguir estes efeitos, o sistema de proteção deve assegurar a continuidade de alimentação dos usuários, bem como salvaguardar o material e as instalações da rede (COURY, OLESKOVICZ e GIOVANINI, 2007).

Dentre os diversos equipamentos que constituem o SEP, destacam-se os transformadores, que devido a sua importância para o funcionamento da rede elétrica, necessitam de cuidados especiais tanto de operação quanto de manutenção. Neste sentido, vários métodos de proteção foram propostos e estão em constante avaliação, a fim de garantir uma operação normal deste equipamento, evitando que este continue em funcionamento em situações adversas e indesejáveis.

A filosofia mais aplicada para a proteção dos transformadores de potência com capacidade acima de 10 MVA considera a análise das correntes diferenciais (HARLOW, 2007). Entretanto, esta técnica está sujeita a algumas imprecisões, uma vez que determinadas condições normais de operação destes equipamentos possuem características semelhantes à de situações indesejadas.

Além das situações indesejadas à proteção, em um panorama mais abrangente, vale também observar os transformadores e, a partir destes, as relações (interações) pertinentes com o SEP no contexto da QEE (MESUT e JINSANG, 2006). Como fato, tem-se que nos dias atuais, a QEE se tornou uma questão importante tanto para as concessionárias de energia como para o consumidor final, sendo que a demanda por energia "limpa" tem sido crescente nos últimos anos. O motivo é devido, principalmente, ao aumento da utilização de equipamentos micro processados em vários segmentos relacionados à geração, transmissão, distribuição e consumo final da energia. Cabe também comentar que, geralmente, para o estudo dos níveis da QEE associados às anomalias evidenciadas sobre o sistema, a maioria dos estudos

leva em consideração as formas de onda da tensão, pois as concessionárias só conseguem garantir o nível de tensão para o consumidor final, não tendo controle sobre o tipo de carga instalada e/ou conectada em um determinado ponto de acoplamento comum.

Neste contexto, este trabalho se propõe a aprimorar o algoritmo de proteção e monitoramento de transformadores, desenvolvido por BRANCO (2009), realizando um estudo mais aprofundado das usuais condições de operação do transformador, diante dos distintos fenômenos relacionados à proteção de transformadores. Ainda sobre as condições operacionais, busca-se também por esta pesquisa, uma análise da influência de diferentes eventos originados sobre o sistema (pelos consumidores) para a operação dos transformadores e seus respectivos desdobramentos na QEE evidenciados sobre as formas de onda das tensões e correntes trifásicas.

Vale adiantar que o algoritmo aprimorado e finalizado foi implementado sobre teorias atualmente empregadas nos estudos relacionados à proteção digital e à QEE, que são a Transformada *Wavelet* (TW) (WALKER, 1999) e Sistemas Inteligentes, como por exemplo, Lógica *Fuzzy* (LF) (JANG, 1993) e Redes Neurais Artificiais (RNA) (HAYKIN, 2001).

1.1 Objetivos

Como resultado final deste trabalho, pretende-se viabilizar um classificador rápido e preciso na diferenciação entre as correntes de faltas, das correntes que não devem sensibilizar a proteção. O classificador deve ser confiável o suficiente para permitir realizar uma análise dos eventos de QEE observados sobre as tensões e correntes medidas no lado de alta e de baixa do transformador associando-os, ou com as situações relacionadas à proteção diferencial, ou aos eventos ocorridos no lado de baixa do transformador, em função das cargas (consumidores) conectados ao sistema.

Por tal abordagem, pretende-se averiguar a interação entre consumidor e concessionária, o que foge um pouco do que usualmente é aplicado. Portanto, busca-se aliar um método de detecção e de classificação de problemas que possam afetar a filosofia da proteção digital diferencial, possibilitando, sempre que possível, associá-los ao contexto da QEE, além de buscar uma associação entre os eventos relacionados à QEE no lado de baixa e os valores esperados pela concessionária de energia no lado de alta do transformador em questão. Desta maneira, serão verificadas as ocorrências de discontinuidades nas formas de onda das tensões e correntes no transformador em análise.

1.2 Organização do trabalho

O texto encontra-se dividido em mais sete capítulos, além desta introdução. O capítulo 2 apresenta os conceitos básicos dos problemas abordados e aponta as técnicas a serem utilizadas. Já o capítulo 3, discorre sobre o estado da arte, no que se refere ao tema proposto. O SEP e sua respectiva modelagem são descritos no capítulo 4, além das simulações computacionais realizadas. No capítulo 5 é apresentada a metodologia proposta, enquanto no capítulo 6 são expostos os resultados obtidos e as respectivas análises. O capítulo 7 apresenta as conclusões finais sobre o trabalho. Por fim, são listadas as referências utilizadas no trabalho.

2. CONCEITOS FUNDAMENTAIS E FERRAMENTAS CONSIDERADAS

Neste capítulo, os conceitos fundamentais sobre a proteção diferencial de transformadores e QEE serão abordados. Além disto, técnicas de processamento de sinais (Transformada *Wavelet*) e inteligentes, como, a Lógica *Fuzzy* e Redes Neurais Artificiais serão comentadas, visto que serão utilizadas no decorrer deste trabalho.

2.1 A proteção diferencial de transformadores de potência

Como prática, tem-se que a metodologia de proteção mais empregada em transformadores com capacidade acima de 10 MVA é a diferencial percentual, cuja base é a diferença fasorial entre as correntes que entram e saem dos equipamentos, quando tal diferença excede um limiar pré-estabelecido (HARLOW, 2007), conforme ilustra a Figura 1. Esta mostra também o esquema de conexão dos TC acoplados em série ao ramo primário e ao secundário. Neste, $N_p:N_s$ é a relação de transformação entre o primário e o secundário do transformador protegido.

Figura 1 - A proteção diferencial para transformadores. Fonte: (BRANCO, 2009).

Durante a operação normal do transformador e em caso de faltas externas, as correntes secundárias dos TC (i_{ps} e i_{ss}) são iguais, desde que $N_p/N_s = N_2/N_1$. Todavia, no caso de

ocorrência de faltas internas, a diferença fasorial entre as correntes será expressiva, provocando a sensibilização do relé.

O funcionamento da proteção diferencial de transformadores pode ser mais bem compreendido se for analisada a circulação de corrente conforme ilustra a Figura 2. Nesta os fluxos de corrente trifásicos são apresentados para (a) a situação normal de operação e (b) para uma situação de falta interna.

Figura 2 - Análise da circulação de corrente. (a) Operação normal. (b) Falta interna.

Fonte: (BARBOSA, 2010).

Observa-se que na Figura 2 (a), a corrente que entra na zona de proteção diferencial é igual a que sai (operação normal). Caso contrário, o sistema de proteção deverá atuar. Já a Figura 2 (b) apresenta a circulação de corrente quando ocorre uma falta entre as fases do transformador. Neste caso, verifica-se que há circulação de corrente pelas bobinas de operação do relé nas fases A e B, o que provocará a retirada do transformador de serviço (ARAÚJO, *et al.*, 2005).

A forma mais utilizada do relé diferencial é o tipo diferencial percentual, que apesar de seguir essencialmente a mesma filosofia já apresentada, possui um circuito diferencial que adiciona maior robustez à sensibilização por pequenas correntes diferenciais, uma vez que as bobinas de retenção permitem uma variação nos limiares de atuação (ARAÚJO, *et al.*, 2005).

Desta forma, o relé diferencial percentual compara as correntes de restrição com as correntes de operação. A corrente diferencial pode ser definida pela soma fasorial das correntes que entram no elemento protegido, conforme a equação 1 (HARLOW, 2007):

$$\vec{i}_d = \left| \vec{i}_{ps} + \vec{i}_{ss} \right| \quad (1)$$

Observa-se que i_d é proporcional a corrente de falta interna e aproximadamente zero para quaisquer outras condições de operação. Assim, se houver uma situação faltosa no transformador, a proteção diferencial será acionada.

No entanto, associada à configuração, tem-se várias e prováveis fontes de erros, como os das relações de transformação dos TC de medição utilizados e das mudanças de *tapes*, quando evidenciadas (KINDERMANN, 1999). Tais imprecisões podem comprometer o funcionamento do sistema de proteção, proporcionando uma atuação de maneira equivocada deste, já que pequenas correntes diferenciais podem surgir em condições normais de operação. Para corrigir esses problemas, fixa-se uma margem de segurança a partir da qual o relé deverá atuar:

$$\vec{i}_d \geq K \quad (2)$$

$$\vec{i}_d \geq K'' \left(\frac{|\vec{i}_{ps}| - |\vec{i}_{ss}|}{2} \right) \quad (3)$$

Sendo que K é a corrente mínima de operação, e K'' é a inclinação percentual diferencial.

A Figura 3 ilustra uma característica típica de operação do relé diferencial, incluindo suas zonas de operação e de restrição. Alguns ajustes de restrição também são apresentados na figura com o objetivo de permitir possíveis correntes diferenciais provocadas pelos erros anteriormente citados. A característica consiste de uma linha inclinada (K'') e uma reta horizontal (K) definindo o limiar mínimo ou de *pick-up* de corrente. A região de operação é localizada acima da característica inclinada e a de restrição abaixo da mesma curva (HARLOW, 2007).

Figura 3 - Curva característica da proteção diferencial.

Além das imprecisões citadas, falsas correntes diferenciais podem também ser ocasionadas por alguns tipos de manobras realizadas no transformador e por situações de curtos-circuitos próximos a este. Tais circunstâncias podem promover elevadas correntes diferenciais, suficientes para sensibilizar e provocar uma atuação indevida da proteção diferencial (HOROWITZ e PHADKE, 1995), (SENGUL, *et al.*, 2005).

Entre estas manobras realizadas no transformador encontra-se a energização, que normalmente é realizada a vazio. Nesta situação, devido ao secundário do transformador permanecer em aberto, ocorre o aparecimento de altas correntes diferenciais, as quais podem sensibilizar e operar indevidamente a proteção (COURY, OLESKOVICZ e GIOVANINI, 2007).

Eventualmente a energização do transformador pode ocorrer sob carga. Neste caso, a presença de segundo harmônico nem sempre é suficiente para bloquear a proteção (LIN e LIU, 2005).

Além disto, usualmente os transformadores são energizados em paralelo com os demais equipamentos, o que provoca transientes e sobretensões nos transformadores próximos, mesmo que estes estejam em operação normal (SENGUL, *et al.*, 2005), (BRONZEADO e YACAMINI, 1995). Este fenômeno é denominado energização solidária e também pode comprometer a operação correta dos dispositivos de proteção diferencial.

Outra causa de corrente diferencial indesejável ocorre durante a rejeição de cargas ou outras condições de operação em que o transformador esteja sujeito a sobretensões em regime permanente, caracterizando a sobre-excitação do transformador (BERNARDES, 2006).

Falsas correntes diferenciais podem ser evidenciadas, também, no caso de saturação dos TC. Como fato, sabe-se que em algumas situações de curtos-circuitos externos e próximos aos TC, as correntes registradas podem ser elevadas. Dado este fato, o TC alocado próximo à ocorrência poderá ser levado à condição de saturação e apontar uma falsa corrente diferencial que poderá ser mal interpretada pela filosofia de proteção adotada (SEGATTO, 2005). A saturação dos TC pode ser causada também, pela componente assimétrica da corrente de falta, de forma que, mesmo para baixas correntes de curto-circuito, sejam caracterizadas correntes diferenciais indevidas e, como consequência, um erro de operação do sistema de proteção.

Segundo HARLOW (2007), as principais características do TC em saturação são:

- O TC reproduz satisfatoriamente a corrente do primário para um determinado tempo após o instante de inserção da falta. O tempo de saturação depende de vários fatores, mas normalmente é em torno de um ciclo ou mais;
- A saturação mais crítica do TC ocorre devido a componente simétrica da corrente do primário. Durante o período da corrente contínua, a corrente do secundário pode conter um deslocamento assimétrico, além de componentes harmônicos pares e ímpares;
- Quando a componente assimétrica acaba, o TC possui somente a saturação em corrente alternada, caracterizada pela presença de componentes ímpares na corrente do secundário.

2.2 A qualidade da energia elétrica

Reportando-se agora à QEE, esta constitui, na atualidade, um fator crucial para a competitividade de praticamente todos os setores industriais e de serviços. O conceito de qualidade da energia está relacionado a um conjunto de alterações que podem ocorrer no sistema elétrico. Segundo DUGAN *et al.* (2002), podemos associar QEE com qualquer problema manifestado na tensão, corrente ou desvio de frequência, que resulta em falha ou má operação de equipamento dos consumidores.

Usualmente há padrões muitos bem definidos de medidas para determinar a qualidade da tensão, buscando denotar uma forma de onda o mais próximo possível de uma senoide, a simetria do sistema elétrico e magnitudes das tensões dentro de limites aceitáveis. Baseando-se em tais padrões, convencionalmente, associa-se a QEE à qualidade de tensão, já que o for-

necedor de energia pode somente controlar a qualidade da tensão, mas não tem controle sobre a corrente que cargas particulares e/ou específicas podem requerer (OLESKOVICZ, 2007).

Como fato, tem-se que os problemas associados aos distúrbios de QEE podem causar falhas ou má operação de aparelhos ligados ao sistema elétrico de potência, ocasionando sérios prejuízos às concessionárias de energia e aos consumidores, principalmente aos de nível industrial. Com as atuais características das cargas e do sistema, a tendência é que os problemas associados à ocorrência de distúrbios da QEE se agravem e, por consequência, os prejuízos associados devem ser bem mais elevados. Por isso, atualmente, muitos esforços têm sido direcionados para amenizar os transtornos e prejuízos associados aos distúrbios da QEE.

Dentre os distúrbios de QEE que podem ocorrer de forma isolada, ou simultaneamente com uma falta interna ao transformador, os quais serão foco deste trabalho na verificação do desempenho sistema de proteção quando da presença, tem-se (ANEEL, 2012):

Afundamento de tensão: fenômeno caracterizado pela diminuição do nível de tensão para valores entre 10% e 90% do valor eficaz da tensão do sistema, durante um período superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três minutos com conteúdo harmônico fundamental predominante.

Elevação de tensão: fenômeno caracterizado pelo aumento do nível de tensão para valores superiores a 110% do valor eficaz da tensão do sistema, durante um período superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três minutos com conteúdo harmônico fundamental predominante.

Desequilíbrio de tensão: fenômeno caracterizado pelo desvio máximo dos valores médios das tensões, dividido pela média dos mesmos valores, expresso em porcentagem. Outra maneira, de ser quantificado é pela utilização da teoria de componentes simétricos, tomando-se a razão entre os componentes de sequência negativa com o de sequência positiva.

Distorção harmônica: fenômeno caracterizado por alterações na forma de onda senoidal do sinal provocadas pela presença de componentes harmônicos diferentes da frequência fundamental de forma contínua.

Flutuação de tensão: fenômeno caracterizado por variações sistemáticas dos valores eficazes de tensão, ou uma série de mudanças aleatórias.

Cabe comentar que as subestações se mostram como uma ótima escolha para o local de instalação de ferramentas para a classificação automatizada de distúrbios associados à QEE, pois a aquisição das variáveis necessárias a tal tarefa é constantemente realizada, como, por exemplo, as correntes nos lados primário e secundário dos transformadores de potência direcionadas à proteção digital diferencial (MESUT e JINSANG, 2006). Cabe frisar que no ambiente da subestação existem também diversos equipamentos dedicados ao monitoramento das tensões e correntes trifásicas direcionadas aos sistemas de proteção e à QEE. A instalação de um indicador e classificador automatizado de fenômenos evidenciados no sistema aproveitaria os equipamentos já existentes nestes locais para obtenção de dados, e, além disto, seria de grande valia tanto às filosofias de proteção adotadas como para a QEE, viabilizando mapear e melhor conhecer as reais situações que um determinado sistema estará sujeito em campo. Além do mais, seria de grande valia para o corpo das concessionárias terem uma ferramenta em mãos que relacionasse os eventos de QEE que ocorreram no lado de baixa dos transformadores com os possíveis efeitos no lado de alta, sendo tal abordagem um dos objetivos deste trabalho.

2.3 A Transformada *Wavelet*

A Transformada *Wavelet* (TW) vem sendo bastante utilizada na análise de sinais (principalmente sinais aperiódicos, ruidosos e com presença de transitórios), com uma boa

eficiência quando comparada a outras ferramentas empregadas para esta finalidade (WALKER, 1999). Além disto, esta ferramenta possibilita a análise de um sinal, simultaneamente, nos planos do tempo e da frequência. O principal motivador para a aplicação da TW em SEP é que, além de possibilitar uma boa extração das características dos sinais elétricos, esta ferramenta possibilita a detecção precisa do início de uma descontinuidade em um sinal.

Historicamente, o conceito de *wavelets* começou a se desenvolver em torno da década de 1980. O conceito empregado atualmente pode ser visto como síntese de várias ideias originadas em diferentes áreas do conhecimento como matemática, física e engenharia. Em 1982, o engenheiro francês Jean Morlet apresentou a TW como uma nova ferramenta matemática para a análise de ondas sísmicas. No método de Morlet, o sinal é constituído de diferentes características no tempo e na frequência, onde suas componentes de alta frequência devem possuir um tempo de duração menor que as componentes de baixa frequência. Para obter bons resultados (ou resolução) no tempo para transitórios de alta frequência, e boa resolução na frequência para componentes de baixa frequência, o pesquisador francês introduziu a ideia de que as *wavelets* são uma família de funções construídas a partir de dilatações e translações de uma função simples conhecida como *wavelet* mãe (DEBNATH, 2002). Neste contexto, essa seção apresenta um breve resumo sobre a teoria básica da TW em algumas de suas perspectivas de aplicações.

2.3.1 Funções *Wavelets*

As funções *wavelets* são definidas como (DEBNATH, 2002):

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (4)$$

Na qual, a é um número real conhecido como parâmetro de dimensionamento que determina o grau de compressão ou escala, e b é um número real chamado de coeficiente de translação que indica a localização temporal da *wavelet*.

Se $|a| < 1$, a *wavelet* está comprimida (contraída), ou seja, o suporte está menor no domínio do tempo que a *wavelet* mãe e corresponde principalmente para altas frequências. Por outro lado, se $|a| > 1$, a *wavelet* está dilatada com uma largura maior no tempo, o que corresponde a baixas frequências.

Já o parâmetro b proporciona a varredura do sinal a ser analisado. Desta maneira, as *wavelets* se adaptam na largura do tempo para suas frequências, possibilitando que as análises dos sinais sejam realizadas no tempo e na frequência. Por estas manipulações transforma-se um sinal de entrada em outra forma de onda, com desdobramentos no tempo e em escalas (níveis) (BRANCO, 2009).

As Figuras 4 e 5 apresentam os procedimentos de dilatação e translação às funções base Gaussiana e Hat Mexicana, respectivamente.

Figura 4 - Dilatação de uma *wavelet*.

Fonte: (BRANCO, 2009)

Figura 5 - Translação de uma *wavelet*.
Fonte: (BRANCO, 2009)

O termo *Wavelet*, como supracitado, denomina uma família de funções simples por meio das operações de dilatação e translação. Tais famílias são utilizadas de modo a facilitar o estudo de certas operações integrais, o que proporciona uma vasta gama de aplicações, como em processamento de sinais e na solução numérica de integrais e equações diferenciais parciais (CHUI, 1992). Desta forma, a utilização de uma família de funções em uma determinada aplicação depende da natureza do sinal e dos requisitos de análises que se deseja alcançar (ADDISON, 2002). A Figura 6 ilustra alguns exemplos de *wavelets* mãe comumente aplicadas.

Embora as famílias sejam formadas por funções simples, nem toda função simples pode ser utilizada na composição destas, uma vez que certas condições matemáticas devem ser atendidas, como (ADDISON, 2002):

A *wavelet* tem que ser absolutamente integrável:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \Psi(t) dt < \infty \quad (5)$$

Figura 6 - Formas básicas de algumas funções *wavelets*.
Fonte: (BARBOSA, 2010)

Embora, na prática, as funções *wavelets* sejam normalizadas para que sua energia seja unitária, estas podem possuir quaisquer energias, desde que sejam finitas e preservadas pela análise:

$$E = \int_{-\infty}^{+\infty} |\Psi(t)|^2 dt < \infty \quad (6)$$

A condição de admissibilidade também deve ser respeitada, conforme a equação a seguir:

$$C_g = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\Psi(F)|^2}{f} df < \infty \quad (7)$$

Na qual, $\Psi(F)$ é a Transforma de Fourier de $\Psi(t)$.

As *wavelets* complexas não possuem componentes de frequências negativas.

2.3.2 Transformada *Wavelet* Contínua

Após a escolha da função *wavelet* base, pode-se realizar uma transformação do sinal a ser analisado em função da base, utilizando os intervalos dos coeficientes a e b . Assim, a TW de um sinal contínuo em respeito à função *wavelet* é definida por (ADDISON, 2002):

$$T(a, b) = w(a) \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \Psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \quad (8)$$

Na qual, $w(a)$ é a função de peso, geralmente definida como $1/\sqrt{a}$, em razão da conservação da energia do sinal, e $*$ é o conjugado da função *Wavelet* utilizada. Desta forma, a TW pode ser observada como uma correlação cruzada do sinal com um conjunto de *wavelets* com as mais variadas larguras (dilatadas ou contraídas) transladadas ao longo do sinal. A TW com $w(a) = 1/\sqrt{a}$ é conhecida como Transformada *Wavelet* Contínua (TWC).

Embora a TWC seja linear como a Transforma de Fourier, esta não é uma transformada simples. Contudo, quaisquer transformações podem ser obtidas a partir da equação 8. De modo análogo à TW, a TWC possui uma transformada inversa, sendo esta definida como (DEBNATH, 2002):

$$x(t) = C_g^{-1} \int_{-\infty}^{+\infty} T(a, b) \Psi_{a,b}(t) (a^{-2} da) db < \infty \quad (9)$$

Na qual, C_g é a condição de admissibilidade supracitada. Todavia, a Transformada *Wavelet* Contínua Inversa (TWCI) apenas permite que o sinal seja recuperado se a TW for

integrável em todas as escalas e localidades, ou seja, para quaisquer que sejam a e b (ADDISON, 2002).

2.3.3 Transformada *Wavelet* Discreta

A função *wavelet* foi definida continuamente em relação aos parâmetros de escala (a) e de dilatação (b), o que torna sua aplicação limitada em sistemas reais. Assim, de modo a proporcionar uma gama maior de aplicações práticas envolvendo algoritmos numéricos, a *wavelet* contínua foi discretizada em uma grade de pontos. Para isso, a *wavelet* mãe Ψ pode ser definida como (DEBNATH, 2002):

$$\Psi_{m,n}(t) = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \Psi\left(\frac{t - nb_0 a_0^m}{a_0^m}\right) \quad (10)$$

Sendo m e n , os parâmetros inteiros que controlam a dilatação e a translação, respectivamente e a_0 e b_0 , as constantes de passo de dilatação e o parâmetro de localização.

Desta forma, a TW de um sinal contínuo, $x(t)$, usando os valores discretizados das *Wavelets* é:

$$T_{m,n} = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \frac{1}{\sqrt{a_0^{m/2}}} \Psi\left(\frac{a_0^{-m} t - nb_0}{a}\right) dt \quad (11)$$

Ou, na forma compacta, como:

$$T_{m,n} = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \Psi_{m,n}(t) dt \quad (12)$$

Outra possibilidade, é definir a TWD na forma de produto interno, como na equação 13 (BRANCO, 2009):

$$T_{m,n} = \langle x \cdot \Psi_{m,n} \rangle \quad (13)$$

Os valores de saída da TWD caracterizam as altas frequências, que muitas vezes representam ruídos presentes no sinal e são conhecidos como coeficientes de detalhe (D) da TW.

As *wavelets* discretas são associadas às funções conhecidas como escalas, que por sua vez fornecem uma versão suavizada do sinal original, sendo estas funções também chamadas de *wavelet* pai (ADDISON, 2002). A convolução da função escala com um sinal produz coeficientes de aproximação (A) da TWD. As equações 14 e 15 mostram como são calculadas as funções escalas e os coeficientes de aproximação, respectivamente.

$$\Psi_{m,n}(t) = 2^{-m/2} \Phi(2^{-m}t - n) \quad (14)$$

$$A_{m,n} = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \Phi_{m,n}(t) dt \quad (15)$$

Um sinal original de entrada $x(t)$ pode ser representado pela combinação dos seus coeficientes de aproximação com seus coeficientes de detalhe, como segue:

$$x_m(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} A_{m,n} \Phi_{m,n}(t) \quad (16)$$

$$d_m(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} D_{m,n} \psi_{m,n}(t) \quad (17)$$

$$x(t) = x_{m_0}(t) + \sum_{m=-\infty}^{m_0} d_m(t) \quad (18)$$

Nas quais, $x_m(t)$ é uma versão suavizada do sinal original reconstruído a partir de sua aproximação de nível m , m_0 é uma escala arbitrária, e $d_m(t)$ é a aplicação da TWD inversa ao detalhe de nível m .

A partir da equação 18, é possível obter a seguinte expressão (ADDISON, 2002):

$$x_{m-1}(t) = x_m(t) + d_m(t) \quad (19)$$

Observando a equação anterior, verifica-se que se o detalhe do sinal em sua escala arbitrária m for adicionado à aproximação na mesma escala supracitada, obtém-se a aproximação do sinal em uma escala anterior $m - 1$. Tal processo de obtenção sucessiva de aproximações e detalhes do sinal original consiste no algoritmo de Análise Multiresolução (AMR) (ADDISON, 2002).

Outra observação pertinente a ser feita é que, na prática, os sinais de entrada $x(t)$ para as funções $\Phi(t)$ e $\Psi(t)$, são sinais discretizados no tempo. Assim, o tamanho N do vetor com o sinal de entrada discretizado deve ser uma potência de 2, dada por $N = 2^M$ (ADDISON, 2002). Desta forma, o número de níveis que pode ser obtido em uma AMR está compreendido em $0 < m < M$ (BRANCO, 2009).

2.3.4 Implementação da TWD por um Banco de Filtros

A aplicação da TW em SEP pode ser feita por meio de uma implementação de banco de filtros, uma vez que do ponto de vista prático, a TWD é um processo de filtragem digital no domínio do tempo, via convolução discreta, acompanhada do operador *downsampling* (redução do número de amostras) por 2 (WALKER, 1999). A Figura 7 ilustra vários níveis de decomposição de um dado sinal pelo emprego da TWD. Como mostra a figura, um sinal é filtrado por um filtro passa-baixa (h) e por um filtro passa-alta (g), e então é aplicado o operador *downsampling* na saída de cada filtro. Este processo pode ser feito várias vezes, para obtenção da decomposição em diferentes níveis, originando o processo conhecido como Análise Multiresolução (AMR). Cabe frisar que o filtro passa-baixa sempre fornecerá uma aproximação do sinal, pois desempenha o papel da função Φ , e que o filtro passa-alta o detalhe deste, já que tem a mesma função de Ψ . O sinal resultante da filtragem é dado pela concatenação da aproximação com os detalhes.

A TWD não é única, uma vez que depende dos filtros passa-baixa e passa-alta utilizados. Sendo assim, um parâmetro chave para trabalhar com a TW é a escolha da *wavelet* mãe que será empregada.

Figura 7 – Transformada *Wavelet* Discreta – AMR.
Fonte: (WALKER, 1999)

2.3.5 Transforma *Wavelet Packet*

A Transforma *Wavelet Packet* (TWP) discreta consiste em uma generalização da TW, na qual os filtros são aplicados sempre à aproximação do sinal e ao detalhe, resultando no desenvolvimento completo da árvore de coeficientes (JENSEN e HARBO, 2000), como ilustrado na Figura 8. Tal abordagem resulta em uma maior resolução no domínio da frequência, possibilitando uma melhor extração das características desejadas na aplicação. Por este motivo em específico, a TWP foi adotada neste trabalho. A Tabela 1 exemplifica como ocorre a divisão da frequência quando da aplicação da TWP. Em (BRANCO, 2009), é mostrado como utilizar a energia das amostras de cada uma das faixas de frequência para obter os valores harmônicos presentes em um sinal.

Figura 8 - Árvore de coeficientes quando da aplicação da TWP até o terceiro nível.
Fonte: (BRANCO, 2009)

Tabela 1 - Faixas de frequência da aplicação da TWP ilustrada na Figura 8.

Folha	Nº de amostras	Faixa de frequência (Hz)
Sinal de entrada	N	$0 \sim f$
$A_{1,1}$	$N/2$	$0 \sim f/2$
$D_{1,1}$	$N/2$	$f/2 \sim f$
$A_{1,2}$	$N/4$	$0 \sim f/4$
$D_{1,2}$	$N/4$	$f/4 \sim f/2$
$A_{2,2}$	$N/4$	$f/2 \sim 3f/4$
$D_{2,2}$	$N/4$	$3f/4 \sim f$
$A_{1,3}$	$N/8$	$0 \sim f/8$
$D_{1,3}$	$N/8$	$f/8 \sim f/4$
$A_{2,3}$	$N/8$	$f/4 \sim 3f/8$
$D_{2,3}$	$N/8$	$3f/8 \sim f/2$
$A_{3,3}$	$N/8$	$f/2 \sim 5f/8$
$D_{3,3}$	$N/8$	$5f/8 \sim 3f/4$
$A_{4,3}$	$N/8$	$3f/4 \sim 7f/8$
$D_{4,3}$	$N/8$	$7f/8 \sim f$

2.4 Lógica Fuzzy

A teoria de conjuntos *Fuzzy* possibilita o tratamento de informações de caráter impreciso ou vago por sistemas computacionais (RUSS, SIMPSON e DOBBINS, 1996). Esta teoria

permite a tomada de decisão, e em consequência, a solução de problemas, utilizando-se valores qualitativos representados através de variáveis linguísticas (ADILÉA, 2003).

Diferentemente da lógica clássica, que apenas considera a inclusão ou não de determinados dados em um conjunto (binário), a LF permite que um elemento pertença a mais de um conjunto com diferentes graus de pertinência no intervalo entre 0 e 1. Desta forma, o mapeamento de expressões denominadas qualitativas como “maior” e “menor” são tratadas.

As variáveis utilizadas em *Fuzzy* são chamadas de linguísticas por não terem valores precisos. Cada variável linguística tem um universo de discurso com diversos termos linguísticos que representam os conjuntos *fuzzy* da mesma.

Cada variável linguística é atribuída a uma função que mapeia o seu valor ou grau de pertinência no intervalo de $[0,1]$, considerando o seu domínio. Essa função de mapeamento é conhecida como função de pertinência. Existem diversos tipos de funções de pertinência, mas os tipos mais utilizados são a triangular, trapezoidal, gaussiana e sigmoideal ou logística. A Figura 9 ilustra algumas das principais funções de pertinência utilizadas.

Figura 9 - Funções de pertinência.

Fonte: (BARBOSA, 2010).

É importante salientar que, o mapeamento do universo de discurso é realizado por meio do conjunto de funções de pertinência, as quais representam os diferentes graus de inclusão de uma determinada variável. Cada função de pertinência recebe o nome de termo lin-

guístico, uma vez que esta permitirá o mapeamento de um evento qualitativo, descrito por meio de uma linguagem natural.

2.4.1 Sistemas *Fuzzy*

Diversos métodos para o desenvolvimento de SF são encontrados na literatura técnico-científica. O projeto de controladores ou sistemas *fuzzy* deve identificar os principais parâmetros e determinar um conjunto de termos que está com o correto nível de granulosidade para descrever os valores de cada variável linguística.

A seleção dos tipos das variáveis *fuzzy* afeta diretamente o tipo de raciocínio que será delineado pelas regras que utilizam essas variáveis. Após a definição dos valores dos principais parâmetros do SF, a base de conhecimento é desenvolvida usando as variáveis de controle e os valores que estas podem assumir. Se a base de conhecimento for o conjunto de regras, mais de uma regra será necessária para a seleção do método de decisão.

Um sistema de Inferência *Fuzzy* é composto de cinco blocos principais como mostrado na Figura 10 (JANG, 1993).

Figura 10 - Sistema de Inferência *Fuzzy*.
Fonte: (BRANCO, 2009).

A interface de fuzzyficação é a parte do sistema *fuzzy* responsável por receber as entradas e convertê-las em variáveis linguísticas. Para isto, faz-se uma consulta à base de dados. A base de dados armazena todas as informações sobre discretizações e normalizações do universo de discurso, além de informações sobre as funções de pertinência.

Após a fuzzyficação, tem-se início o procedimento de inferência, que processa os dados de entrada *fuzzy*, em conjunto com as regras de inferência, fornecendo a saída *fuzzy* do sistema. Esse módulo necessita, além das informações contidas na base de dados, das informações da base de conhecimento, a qual contém as regras sobre o conhecimento do sistema.

O projeto da base de conhecimento do SF é dividido basicamente em duas etapas principais. Na primeira, o conjunto de variáveis linguísticas deve ser selecionado para descrever os valores dos principais parâmetros de controle do processo. Tanto os parâmetros de entrada, quanto os de saída, devem ser definidos linguisticamente nesta etapa por meio de um conjunto de termos. A seleção do nível de granularidade do conjunto de termos para as variáveis de entrada, ou para as variáveis de saída, possuem funções importantes na suavidade do controle, permitindo uma varredura contínua do domínio sem grandes saltos. Na segunda etapa, o controle da base de conhecimento deve ser desenvolvida para que seja usada a descrição linguística dos principais parâmetros (YAGER e ZADEH, 1992).

O método mais utilizado para a definição das regras é o baseado na experiência do especialista, ou seja, no conhecimento profissional do especialista sobre o assunto ao qual se deseja controlar. A base de regra *fuzzy* consiste em uma coleção de regras SE-ENTÃO que podem ser expressas como (MENDEL, 1995):

$$R^{(i)}: \mathbf{SE} \ u_1 \text{ é } F_1^1 \ \mathbf{E} \ u_2 \text{ é } F_2^1 \ \mathbf{E} \ ... \ u_n \text{ é } F_n^1, \ \mathbf{ENTÃO} \ v \text{ é } G^1$$

O processo de inferência é utilizado para combinar as regras *fuzzy* do tipo SE-ENTÃO provenientes da base de conhecimento com o mapeamento dos conjuntos *fuzzy* de entrada para os conjuntos *fuzzy* de saída (MENDEL, 1995). Assim, cada regra é interpretada como uma implicação *fuzzy*, e o resultado obtido a partir das regras que foram previamente definidas tem o objetivo de decidir qual a ação de controle que deverá ser tomada.

Um SF é, geralmente, composto por várias regras de inferência. É necessária então, a existência de uma operação que combine as saídas de cada regra, de forma a se obter apenas uma saída. O operador de agregação é o responsável por unir as influências de todas as regras, após a aplicação dos operadores de implicação, apresentando o resultado do sistema.

A defuzzyficação é a operação necessária para obter uma resposta não *fuzzy* que melhor representará a função de pertinência da ação de controle *fuzzy* inferida. Várias metodologias tem sido propostas na literatura, dentre as quais se podem citar:

- Método de defuzzyficação de Tsukamoto;
- Método do centro de área;
- Método da média dos máximos;
- Método do primeiro máximo; e
- Método do último máximo.

2.5 Redes Neurais Artificiais

As Redes Neurais Artificiais (RNA) são modelos computacionais inspirados no cérebro humano e que possuem a capacidade de aquisição e manutenção da informação. Podem-se definir RNA também como: conjuntos de unidades de processamento (neurônios) que são interligadas por um grande número de sinapses, as quais têm pesos sinápticos associados (HAYKIN, 2001).

Atualmente, as RNA têm sido uma das escolhas preferidas para fazer a classificação de dados e reconhecimento de padrões. Isso ocorre devido a algumas características interessantes destes modelos, como: capacidade de aprender com exemplos, a não necessidade de grande conhecimento sobre as estatísticas dos dados, além da capacidade de se adaptar ou aprender. No tocante ao SEP, as RNA têm sido utilizadas para vários fins, destacando-se sua utilização na proteção digital, como reconhecedor de padrões e como classificador de distúrbios associados à QEE.

O modelo geral de um neurônio artificial está ilustrado na Figura 11 onde se observa que a saída de um neurônio é resultante da aplicação da função de ativação $g(\cdot)$ sobre o resultado do combinador linear. Por sua vez, o combinador linear realiza o somatório das entradas multiplicadas pelos seus respectivos pesos. Os pesos são usados para definir a influência de cada entrada recebida por um neurônio na sua saída. Neste sentido, os pesos sinápticos são os responsáveis pelo armazenamento do conhecimento e de informações de um neurônio.

Figura 11 - Modelo matemático de um neurônio artificial.

2.5.1 Arquitetura da Rede

São muitas as variantes de uma RNA. Combinando-as, é possível mudar a arquitetura conforme a necessidade de aplicação. Definir a arquitetura de uma RNA consiste em determi-

nar sua organização estrutural contemplando o número de camadas da rede, número de neurônios em cada camada, tipos de conexões entre os neurônios e a topologia da rede. Sua arquitetura é estabelecida conforme a necessidade da aplicação. Basicamente, outros itens que compõem uma RNA e, portanto, sujeitos às modificações, são a função de transferência e o algoritmo de aprendizado.

Normalmente, as redes neurais são estruturadas em camadas, contendo um ou mais neurônios. Todas as redes possuem camada de entrada, que recebem os sinais de entrada, e camada de saída, que armazena o resultado final da rede. As camadas intermediárias (camadas ocultas) localizam-se entre essas duas.

Quanto ao tipo de conexão as redes podem ser *feedforward* (acíclica) ou recorrente (cíclica). A recorrente se diferencia da acíclica por possuir pelo menos uma realimentação (*feedback*), pelo qual a saída de um neurônio de uma camada i é utilizada como entrada de um neurônio da camada de ordem menor ou igual a i (HAYKIN, 2001).

As redes podem ser completamente conectadas, quando todos os neurônios estão conectados entre si, ou fracamente conectadas, quando pelo menos dois neurônios apresentam ligações entre si.

2.5.2 Processo de Aprendizagem ou Treinamento

O treinamento consiste essencialmente na modificação sistemática dos pesos das interconexões entre as unidades neurais. Como o conhecimento associado a RNA é armazenado nas interconexões, esse processo de ajuste provoca uma alteração no nível de conhecimento da rede. Por isso, o aprendizado pode ser caracterizado como o ajuste automático dos pesos em função da informação presente na RNA e de cada valor de entrada fornecido.

A RNA é caracterizada por sua arquitetura, pelo seu algoritmo de processamento e processo de treinamento. A arquitetura especifica como os neurônios estão conectados. O algoritmo de processamento informa o comportamento da RNA frente a um dado conjunto de entradas, uma vez que o número de conexões, definido pelos neurônios conectados, possui um determinado conjunto de pesos associado. Já o processo de aprendizagem determina como a RNA vai adaptar seus pesos sinápticos para todo o conjunto de treinamento.

É importante conhecer três conceitos básicos do processo de treinamento:

- **Algoritmo de treinamento:** conjunto de procedimentos utilizados para ajustar os parâmetros (pesos das conexões) das redes neurais, de maneira que possam realizar determinada função;
- **Número de épocas:** número de vezes que todos os padrões (exemplos) serão apresentados às redes neurais, a fim de que se faça a atualização dos pesos;
- **Taxa de aprendizado:** controla a intensidade das alterações dos pesos. Uma alta taxa de aprendizado acelera o processo de aprendizagem, embora esta possa reduzir a capacidade generalização da RNA.

Uma distinção primária entre diferentes tipos de RNA é em função do tipo de treinamento realizado. Especificamente, podem-se considerar dois tipos de processos de aprendizagem: o supervisionado e o não supervisionado (DILLON e NIEBUR, 1996).

O processo supervisionado consiste na situação na qual a rede necessita de um conjunto de amostras ou padrões, de modo que a cada padrão de entrada seja associado um respectivo padrão de saída. Assim, os valores de saída são utilizados para corrigir iterativamente os pesos já associados até que a RNA responda corretamente aquele conjunto de entrada. Já no treinamento não supervisionado, embora o conjunto de entrada seja conhecido, não há uma saída específica ao estímulo das entradas. Desta forma, a tarefa da RNA é agrupar os conjuntos de treinamento em *clusters*, baseados em algum conceito de similaridade. Entretanto,

quando um novo estímulo é apresentado à rede, esta analisa se pode colocá-lo nos *clusters* já existentes, ou se deve criar um novo agrupamento.

3. TRABALHOS RELACIONADOS À PESQUISA

Para este capítulo, reserva-se um breve levantamento bibliográfico, com alguns dos trabalhos recentemente desenvolvidos e relacionados à temática aqui proposta. Para uma melhor apresentação da pesquisa bibliográfica realizada, os trabalhos serão agrupados relacionando-os à: saturação dos TC; energização sob carga; classificação das condições operativas de transformadores de potência; e classificação de distúrbios associados à falta da QEE.

3.1 Saturação dos TC

O trabalho realizado por TOUSIGNANT, *et al.* (1996) apresenta uma explicação sobre o comportamento interno das correntes em um transformador na presença de excitação em corrente contínua - CC. Os autores afirmam que um transformador saturado funciona como uma fonte de correntes harmônicas que fluem diretamente nos enrolamentos primário e secundário. No trabalho, inicialmente, os autores desenvolvem um modelo matemático para o comportamento destas correntes durante a saturação, principalmente, a corrente de magnetização e seu conteúdo harmônico e, então, desenvolvem um circuito elétrico equivalente básico para o cálculo de um índice para indicar o estado de saturação do transformador de acordo com a diferença entre as amplitudes das correntes do primário e do secundário e as leituras dos conteúdos de 2º e 4º harmônico.

RAHMATI (2010) apresenta uma técnica adaptativa para a proteção diferencial frente a ocorrências de saturação ocasionadas por faltas externas, levando em consideração as características das correntes diferenciais. O método utilizou-se das altas frequências presentes no sinal e, neste sentido, criou-se um índice baseado no primeiro nível de detalhe da Transformada *Wavelet*. Deste procedimento, os sinais foram analisados por meio das características

extraídas e apresentadas pelas correntes diferenciais durante o fenômeno de saturação para frequências entre 2.500 e 5.000 Hz. Basicamente, nesta técnica, com o início do fenômeno de saturação do TC, a corrente de restrição irá ser incrementada do valor do índice obtido e, consequentemente, a atuação da proteção diferencial do relé será restringida. A validação do algoritmo proposto foi feita por meio da simulação de situações de falta interna ao transformador associado e de energização do mesmo, além de casos de saturação do TC utilizando o *software* EMTP (*ElectroMagnetic Transients Program*). Os resultados exibiram uma considerável estabilidade do relé diferencial durante as condições de saturação e energização avaliadas.

Em MONARO *et al.* (2010) é apresentado um método de correção numérico para a redução dos erros de transformação em TCs destinados aos serviços de medição e proteção de redes elétricas. Tal método se baseia na aquisição dos valores da corrente secundária, somando-se aos mesmos os valores correspondentes de corrente de excitação, obtidos a partir de um modelo de núcleo magnético onde são representados os efeitos de histerese e de perdas dinâmicas. O algoritmo foi validado através da simulação de um único TC ligado a uma linha de transmissão variando-se a impedância de carga ligada ao seu enrolamento secundário. Nota-se que os resultados da correção são satisfatórios, porém uma desvantagem apresentada por este método é necessidade de se conhecer vários pontos da curva de histerese do TC para que se obtenha uma precisão adequada.

No trabalho GUERRA, *et al.* (2009) é apresentada uma técnica alternativa para a detecção e correção das formas de ondas distorcidas provenientes da saturação dos TC empregando RNA. O *software* ATP foi escolhido como ferramenta computacional para a simulação de um sistema elétrico utilizado na geração de dados de treinamento e validação das RNA. Desta forma, foram simuladas situações faltosas variando a impedância de falta, o fator de potência e o ângulo de incidência. Neste trabalho é proposto um esquema com duas RNA do

tipo *Perceptron* multicamadas *Time Delay Neural Network* (TDNN) dedicadas à detecção e correção da saturação do TC.

HONG e WEI (2010) apresentam um método para detecção e compensação da forma de onda distorcida da corrente no secundário de TCs devido á saturação e fluxo residual. O trabalho utiliza a TW para detectar o instante inicial da ocorrência de faltas e identificar todos os períodos de saturação. Além disso, cinco características da corrente de falta são extraídas. Um algoritmo *Fuzzy-c-means* foi utilizado para a divisão de todos os tipos de correntes de falta possíveis em 42 *clusters* de acordo com as suas características através de testes estatísticos. Assim, 42 fórmulas de regressão linear foram desenvolvidas individualmente para obter as correntes compensadas em um estágio inicial. O modelo de regras *fuzzy* de *Takagi-Sugeno-Kang* foi posteriormente utilizado para integrar as correntes obtidas através das fórmulas de regressão linear para a corrente compensada no secundário. O método proposto foi avaliado através de simulações variando diversos parâmetros de falta e condições do sistema no ambiente *Simulink/Visual C*. O método foi implementado em seis diferentes módulos através de uma FPGA (*Field-programmable Gate Array*).

Em DASHTI, *et al.* (2009), duas técnicas diferentes são apresentadas para detectar a saturação do TC. A primeira técnica proposta é baseada no fato de que a forma de onda do secundário do TC muda significativamente no instante da saturação. Com base nesta característica, um algoritmo que utiliza a segunda derivada do sinal de corrente na saída do TC é desenvolvido. Este algoritmo usa um limiar adaptativo para a detecção de saturação do TC. A segunda técnica proposta utiliza dois critérios baseados no princípio de cruzamento por zero. Desta maneira, os autores realizam a combinação das técnicas de segunda derivada e cruzamento por zero através de uma lógica “OU”. Assim, o método torna-se capaz de detectar até mesmo pequenos eventos de saturação do TC. Para a avaliação do desempenho do método proposto, um sistema de transmissão com um barramento de 400 kV é simulado usando o

software PSCAD/EMTDC, variando diversos parâmetros de falta e condições de operação do sistema. Também é realizado um breve comentário sobre a saturação do TC devido à falta interna.

No trabalho apresentado por YU (2010), o autor analisa os componentes de decaimento CC em correntes de falta para detectar a saturação do TC. O componente de decaimento CC em correntes de falta é estimado utilizando cálculos baseados em fasores através da Transformada de *Fourier*. O componente CC é então usado para definir certo índice de detecção de saturação. Este índice proposto pode ser facilmente usado já que o seu valor em períodos insaturados está dentro de uma faixa de valores conhecida. Após a saturação do TC detectada, as amostras atuais e os fasores do último período insaturado são utilizados para corrigir as amostras atuais saturadas. Para auxiliar o método proposto, foi desenvolvido outro algoritmo de detecção de faltas que aciona o algoritmo de detecção de saturação. O desempenho do algoritmo proposto foi testado utilizando o ambiente *Simulink/Matlab* através de simulações de várias condições de falta e operação do sistema. O algoritmo também foi testado frente à presença de fontes harmônicas e saturação sem a presença do componente de decaimento CC. Finalmente, o trabalho foi implementado em um processador digital de sinais demonstrando sua aplicabilidade em tempo real.

3.2 Energização sob carga

Uma análise da má operação do mecanismo de proteção diferencial durante a energização do transformador sob carga é feita pelos autores em WENG, LIN e LIU (2007). Para este estudo, foi desenvolvido um novo modelo matemático para energização do transformador agora sob carga e para o TC associado. Como nesta situação, os componentes aperiódicos das correntes de cada lado do transformador são diferentes, a corrente diferencial pode ultrapassar

o limiar mínimo de operação e, ao mesmo tempo, o conteúdo de segundo harmônico ser elevado apenas nos primeiros ciclos e após isto ser baixo suficiente para sair da região de bloqueio, levando em consequência ao mau funcionamento da proteção diferencial.

No trabalho apresentado por WENGI e LIN (2009) é realizada uma análise sobre o fenômeno de ultra saturação, apontando uma má operação do mecanismo de proteção diferencial do transformador durante a entrada de cargas não lineares no sistema. Pelo trabalho, coloca-se que o estado de ultra saturação pode ocorrer devido aos efeitos das indutâncias mútuas entre o núcleo do transformador e da carga não-linear. Neste caso, o grau de saturação do núcleo do transformador se torna extremo e a circulação de fluxo permanece dentro da área próxima ao ponto de saturação durante vários ciclos. Portanto, a corrente no ramo magnetizante do transformador (corrente diferencial) é relativamente elevada e com forma de onda relativamente atenuada. Neste caso, a corrente diferencial pode, eventualmente, exceder o limite de proteção, mas a porção de segunda harmônica é baixa, o que leva à operação indevida da proteção diferencial.

LIN e LIU (2005) apresentam um estudo sobre o fenômeno eletromagnético da energização do transformador sob carga. É ilustrada no trabalho a operação indevida da proteção diferencial durante este fenômeno. Um modelo de circuito equivalente de segunda ordem foi proposto para investigar o fenômeno. Com algumas aproximações e considerações, a solução analítica do fluxo principal é obtida pelo uso da Transformada de *Laplace*. Com a expressão do fluxo deduzida, uma explicação relativamente mais clara da operação indevida da proteção diferencial pôde ser feita. Além disto, o fenômeno de ultra saturação do núcleo do transformador também é demonstrado.

Em WISZNIEWSKI, *et al.* (2008), os autores realizam um estudo sobre o fenômeno da ultra saturação do núcleo do transformador, apontando-o como um problema para os relés de proteção de transformadores de potência. Os resultados relatados ao final do trabalho con-

tribuem para definir as configurações do sistema e os parâmetros que devem ser evitados, a fim de manter um nível seguro de operação, evitando este fenômeno indesejável.

GU, *et al.* (2008) apresentam um estudo relativo à operação indevida da proteção diferencial frente à ocorrência da remoção de uma falta externa devido à saturação do TC. O trabalho evidencia cada um dos três tipos de saturação a que o TC pode ser submetido de acordo com a região da curva de histerese (transiente, parcialmente transiente e ultra saturação). Desse modo, foi realizada uma análise sobre a influência dos parâmetros dos TCs sobre a saturação e suas respectivas consequências para a proteção diferencial, mostrando que nem sempre a restrição que leva em consideração o nível do componente de segundo harmônico presente no sinal funciona adequadamente nas condições de saturação parcialmente transiente e ultra saturação. Sendo assim, foi apresentado um novo método matemático baseado nas simulações realizadas para o aumento da área de restrição deste tipo de proteção no intuito de evitar operações indevidas. Estas simulações foram feitas através do ambiente *Simulink/Matlab*, considerando todos os tipos de faltas em ambos os lados do transformador.

3.3 Classificação das condições operativas de transformadores de potência

Em BRANCO (2009) foi desenvolvida uma metodologia para o monitoramento de transformadores que tem por objetivo apontar a condição de operação do transformador. O algoritmo apresentado utiliza a Lógica *Fuzzy* e a Transformada *Wavelet Packet* para distinguir as seguintes situações: operação normal, energização, energização solidária, sobre-excitação, falta interna e energização sob falta. Ressalta-se o ótimo desempenho apresentado pelo algoritmo, que foi capaz de apontar corretamente a condição de operação do transformador na grande maioria dos casos testados.

Em TRIPATHY (2010), o autor comparou três abordagens para a proteção diferencial de transformadores baseadas em RNA. A primeira abordagem utilizou RNA com dados de entrada pré-processados pela técnica de Análises de Componentes Principais (ACP). A aplicação da ACP tem como objetivo facilitar o treinamento da RNA. A segunda abordagem utiliza uma RNA com Função de Base Radial. Já a terceira trata-se de uma RNA com o treinamento convencional de *backpropagation*. As três arquiteturas tinham como objetivo classificar situações de faltas internas, energização e sobre-excitação do transformador. Os resultados obtidos pelos testes apontaram que a RNA com Função de Base Radial obteve os melhores resultados.

JAZEB *et al.* (2009) apresentam e avaliam a utilização do Modelo de Mistura Gaussiana (MMG) para a discriminação entre as situações de falta interna e correntes de energização. O conjunto de dados foi obtido através de simulações no *software* PSCAD/EMTDC. A Transformada *Wavelet* foi aplicada para extrair características discriminantes de cada situação e o algoritmo de aproximação *k-médias* foi aplicado ao conjunto de dados para reduzir a carga de treinamento e a quantidade de cálculos. A discriminação foi dada pela saída do cálculo dos modelos MMG. Os resultados mostram a estabilidade da técnica de proteção na presença de correntes de energização com diagnóstico robusto de falhas mesmo na presença de sinais ruidosos.

KUMBHAR e KULKARNI (2007) abordam uma formulação e modelagem para a análise do fenômeno de energização solidária. Observa-se, no trabalho, que a energização solidária persiste na rede por um período maior do que a corrente de energização para um transformador ligado sozinho. Os parâmetros que afetam o valor e a duração da corrente, como a resistência em série, ângulo de chaveamento, densidade de fluxo residual e as condições de carga são discutidos em detalhe. Observa-se que, com um aumento na impedância equivalente do sistema, o valor da corrente de energização solidária também aumenta sensivelmente, en-

tretanto é pequeno o efeito sobre a sua duração. A mudança no ângulo de chaveamento, a magnitude e a direção da densidade de fluxo residual podem causar variações significativas nas correntes do fenômeno de energização solidária. Além disso, os valores do fator de potência e das correntes de carga têm um efeito muito pequeno sobre a magnitude e a duração das correntes de energização solidária.

Em VAZQUEZ, *et al.* (2008), o algoritmo proposto explora possibilidade de caracterizar o comportamento da forma de onda da corrente diferencial para distinguir entre faltas internas, condições de energização e de sobre-excitação. O método de ACP é utilizado para extrair as características da corrente diferencial, a fim de implementar um processo de reconhecimento de padrões em um espaço bidimensional. O algoritmo foi avaliado através de inúmeras simulações, que incluem mudanças na carga do transformador, na forma da curva de magnetização, na impedância da fonte, e nas relações de transformação dos TCs. Em todos os casos, o algoritmo conseguiu discriminar perfeitamente entre faltas internas, condições de energização e de sobre-excitação.

Em OLIVEIRA e BRETAS (2009) é apresentada uma nova metodologia para a proteção diferencial de transformadores trifásicos. A Transformada *Wavelet* Discreta (TWD) é empregada para a extração das características transitórias das correntes diferenciais com o objetivo de detectar as condições de faltas internas ao transformador. Para isto leva em consideração o nível do primeiro detalhe, calculando um índice numérico que será comparado a um valor limite para distinguir entre as situações possíveis. Já o desempenho do algoritmo proposto é avaliado através da simulação de situações faltosas e não-faltosas em um transformador usando o *software* ATP/EMTP. Para a escolha do filtro *wavelet* a ser utilizado foi realizada uma análise de desempenho para diferentes tipos de filtros com diferentes suportes, sendo que o filtro de *Daubechies* foi o que apresentou os melhores resultados. A fim de testar o desempenho do método, a técnica foi implementada em ambiente *Matlab*. Pelo trabalho foi rea-

lizada a comparação entre os resultados obtidos pelo método proposto e a proteção diferencial percentual com restrição harmônica. Os resultados mostram uma melhora em relação à discriminação entre situações faltosas e não faltosas (regime permanente, energização, energização sob falta, faltas externas e remoção de faltas externas). Os autores também concluem que a elevação da resistência de falta diminui a precisão do algoritmo, enquanto que a variação de carga não mostra efeitos muito significativos.

3.4 Classificação de distúrbios associados à falta de QEE

No trabalho apresentado por MEYER (2008) é proposto um sistema de classificação baseado na Lógica *Fuzzy* para distúrbios de QEE em ambientes ruidosos utilizando o recurso da TW. Como na prática os sinais obtidos são corrompidos pelo ambiente ruidoso e estão presentes dispositivos de comportamento não linear no sistema, torna-se cada vez mais complexa a tarefa de detecção e classificação exata dos eventos de QEE. Desta maneira, este trabalho propõe a utilização da TW para a extração das características destes eventos por meio de análise tempo-frequência. Sendo assim, a componente ruidosa é removida para facilitar a tarefa de detecção e, conseqüentemente, de classificação. São testados três tipos de filtros *Daubechies* com suportes diferentes (6, 8 e 10), sendo que o filtro *Daubechies* 8 foi o que apresentou o melhor desempenho para esta aplicação. Na pesquisa, os sinais processados pela TW serviram de entrada para o classificador *fuzzy* para a tomada de decisão em relação à classificação do evento. Os seis tipos de eventos simulados para validar o desempenho do algoritmo foram: afundamento de tensão, elevação de tensão, interrupção momentânea de tensão, *notching*, transitórios oscilatórios e impulsivos da tensão. Por fim, é realizada a comparação entre o método de classificação proposto e outros três tipos de classificadores *fuzzy*.

O trabalho desenvolvido em ERISTI e DEMIR (2010) apresenta uma abordagem para a classificação de eventos de QEE baseado na TW e no algoritmo de classificação Máquina de Vetores de Suporte (MVS). Foram simulados seis tipos de eventos no *software* ATP / EMTP (falta fase-terra, falta fase-fase, falta trifásica, chaveamento de carga, chaveamento de banco de capacitores e energização do transformador). Os sinais dos eventos simulados foram contaminados com a presença de um sinal de ruído e então aplicados ao algoritmo proposto, variando a intensidade deste sinal de ruído. Na proposta, um único vetor de características do evento é extraído representando os sinais de cada fase. Desta forma, segundo os autores, garante-se um monitoramento simultâneo das fases, necessitando menos memória e tempo de processamento de treinamento e teste em relação aos algoritmos que necessitam de um vetor para cada fase. Em seguida, os sinais foram direcionados aos processos de normalização e segmentação. Os resultados obtidos indicam que o algoritmo de classificação tem precisão de 99,71% e 95,81% para os casos sem e com a presença de ruídos no sinal, respectivamente.

Tendo sido apresentadas a teoria pertinente ao assunto e o referente estado da arte, prossegue-se no próximo capítulo com a exibição do SEP que será utilizado e as simulações computacionais que serão desenvolvidas durante todo este trabalho para as fases de implementação e de validação da abordagem proposta.

4. O SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA

Nas últimas décadas, a simulação computacional assumiu um papel importantíssimo como ferramenta de aquisição de conhecimento. Tanto que o autor em FORRESTER (1961) já defendia a modelagem e simulação computacional como um meio de estudar fenômenos complexos, trazendo melhorias na compreensão das características de comportamento do sistema real. Além do que, todo o processo é realizado com baixo custo e com maior rapidez. As grandes entidades e empresas logo perceberam isto, como relatado em GAVIRA (2003), e adotaram os modelos computacionais por colaborarem de maneira mais positiva e rápida em suas decisões. Porém, como apresentado em NAYLOR (1971), um aspecto importante a ser levado em consideração é se a técnica irá permitir uma interpretação fácil por parte do usuário, pois caso contrário, todas as vantagens apontadas anteriormente podem não ser tão benéficas.

Considerando todas estas informações sobre a modelagem e simulação computacional, por meio do *software* ATP, foi possível a configuração de um SEP no intuito de validar a técnica proposta neste trabalho.

Neste sentido, para este capítulo, serão apresentadas inicialmente as características do sistema elétrico em análise e, posteriormente, alguns casos simulados referentes às condições de operação do transformador e aos fenômenos relacionados à QEE.

4.1 O Sistema elétrico analisado

Vale comentar que, além da importância para a validação do algoritmo proposto, a modelagem do sistema elétrico foi resultado de um esforço conjunto de membros do Labora-

tório de Sistemas de Energia Elétrica (LSEE), alocado junto ao Departamento de Engenharia Elétrica, da Escola de Engenharia de São Carlos, onde o trabalho foi desenvolvido.

Na Figura 12 está ilustrado o esquema do SEP simulado com os principais nós utilizados nos arquivos de entrada. Trata-se de um modelo completo de um SEP, visto que o mesmo apresenta elementos de geração, transmissão e distribuição de energia e é, basicamente, o mesmo apresentado em BARBOSA (2010). Apenas algumas modificações podem ser constatadas da referência citada, como a inclusão de um alimentador de distribuição e cargas especiais (não lineares) à barra de carga BCGH1, que ainda serão comentados neste capítulo.

O sistema é composto por um gerador síncrono trifásico de 13,8 kV com potência de 90 MVA, conectado em estrela aterrado e ligado ao barramento geral com capacidade de transmissão nominal de 75 MVA. Este gerador é responsável pelo fornecimento da energia elétrica e pela manutenção da potência fornecida ao sistema, agindo como uma fonte de tensão cuja frequência é determinada pela fonte primária (BARBOSA, 2010), que permite a análise do comportamento do mesmo perante variações de cargas e alterações estruturais da rede. Para esta modelagem via ATP, aplicou-se o modelo de máquina trifásica síncrona dinâmica e os parâmetros referentes à modelagem podem ser encontrados em BARBOSA (2010).

Junto ao gerador foram modelados reguladores de velocidade e de tensão para evidenciar ainda mais a proximidade deste modelo com o encontrado em SEP reais. O regulador de velocidade foi utilizado para o controle da máquina permitindo a observação sobre o comportamento do gerador às variações de carga e evitando a perda de sincronismo durante o comportamento dinâmico do SEP. Já o regulador de tensão foi o responsável por manter a tensão de saída constante, independente da variação da carga do SEP. Tanto a modelagem da malha de controle de frequência como da malha de controle da tensão são apresentadas em BARBOSA (2010).

Figura 12 - Sistema elétrico simulado.

No barramento estão conectados três transformadores elevadores (13,8/138 kV), com capacidade de 25 MVA cada, fornecendo energia às três linhas de transmissão, sendo duas delas com comprimento de 50 km e uma de 100 km de extensão. Ao final de cada linha de transmissão estão conectados transformadores abaixadores (138/13,8 kV) seguidos de cargas com diferentes potências e fatores de potência.

Devido à grande relevância dos transformadores, para a representação destes equipamentos utilizou-se de uma modelagem completa por meio do *software* ATP. Assim, com o intuito de analisar o comportamento de cada transformador foram consideradas as relações de transformação, a curva de saturação e as conexões dos enrolamentos delta e estrela.

As Figuras 13 e 14 apresentam, respectivamente, o modelo do transformador monofásico empregado e o detalhe das conexões dos enrolamentos, assim como a utilização da curva de saturação magnética do equipamento. Ainda na Figura 8 é possível observar as resistências (R1 e R2) e indutâncias (L1 e L2), tanto no primário quanto do secundário, respectivamente.

Figura 13 - Modelo do transformador monofásico elevador.

A curva de saturação foi caracterizada pela utilização da rotina SATURATION (PRIKLER e HOIDALEN, 1997), a qual fornece dados de corrente e de fluxo a partir dos valores de tensão e de corrente do transformador provenientes de ensaios, possibilitando a caracterização do equipamento. Os dados utilizados nesta rotina foram extraídos de BERNARDES (2006).

Assim como os transformadores de potência (abaixadores e elevadores) do sistema de transmissão, o transformador do motor de indução trifásico - MIT (13,8/4 kV) com capacidade de 2 MVA utiliza o mesmo modelo saturável do *software* ATP e todos os dados utilizados para a modelagem podem ser encontrados em BARBOSA (2010), GIBELLI (2009).

Figura 14 - Detalhes das conexões dos enrolamentos.

Vale comentar que os TC, TP e TPC necessários para a aquisição dos dados do sistema foram modelados como apresentado em BARBOSA (2010), assim como os controladores de velocidade e de tensão acoplados ao gerador apesar de não aparecerem na Figura 12. A utilização destes transdutores fez-se necessária devido aos níveis de tensão e correntes associados ao SEP simulado, permitindo ainda uma melhor representação das informações obtidas em campo.

Ainda em relação aos TC, duas relações de transformação foram utilizadas (2000:5 e 200:5), as quais se relacionam com as classes de tensão de 13,8 kV e 138 kV, respectivamente. Embora, haja diferença entre as relações de transformação, os demais parâmetros destes equipamentos são os mesmos, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 - Dados do Transformador de Corrente utilizado.

Descrição	Valor
Indutância do Primário	0,10 mH
Resistência do Primário	0,85 Ω
Indutância do Secundário	0,10 mH
Resistência do Secundário	10^{-4} Ω

A Figura 15 ilustra a curva de saturação ($V \times I$) para o modelo do TC com relação de transformação de 2000:5.

Figura 15 - Curva de saturação ($V \times I$) do transformador de corrente.

A modelagem das linhas de transmissão foi realizada considerando os parâmetros distribuídos e variantes com a frequência, por meio da rotina JMARTI, responsável por gerar um modelo para linhas de transmissão baseado na teoria das ondas viajantes considerando a variação de frequência. Todos os dados referentes à modelagem das linhas de transmissão podem ser verificados em BARBOSA (2010).

Com relação às cargas presentes no sistema, estas foram modeladas utilizando-se de elementos passivos, indutivos e capacitivos, de modo que seu fator de potência seja 0,92 indutivo (BARBOSA, 2010).

Conforme já comentado, pela Figura 8, tem-se representado um MIT conectado ao sistema. A modelagem deste motor foi realizada com a utilização do cartão *UM19* do *software* ATP (PRIKLER e HOIDALEN, 1997), no qual vários parâmetros elétricos e mecânicos são utilizados. Junto ao MIT foi adicionada uma carga (compressor industrial) que também foi modelada com parâmetros reais (GIBELLI, 2009).

Devido à existência deste conjunto MIT-compressor que é acionado com partida direta e sob carga, as simulações computacionais e análises só podem ser realizadas após a estabilização da rede elétrica a esta condição de operação.

O alimentador de distribuição e as cargas especiais (não lineares) foram conectados à barra BGCH1, já que o transformador de potência em foco neste trabalho é o TR1A (Dyn1 – conexão delta-estrela com neutro disponível e deslocamento de 30°). Este transformador foi escolhido com o objetivo de simular alguns distúrbios de QEE, como por exemplo, afundamentos, elevações, desequilíbrios, distorções e flutuações nas formas de onda da tensão.

O alimentador da rede de distribuição, ilustrado na Figura 16, possui 90 barras e sua configuração (dados do transformador de potência da subestação, parâmetros dos condutores utilizados e das cargas alocadas, entre outros) foi obtida junto a uma concessionária de ener-

gia elétrica regional. Este alimentador foi modelado por meio da interface gráfica ATPDraw (PRIKLER e HOIDALEN, 2002).

Figura 16 - Alimentador de distribuição utilizado.

Vale comentar que no momento em que o SEP (Figura 8) e o alimentador de distribuição (Figura 16) foram conectados, ao executar o software ATP, foi observado um erro de simulação devido, provavelmente, ao número elevado de nós gerados. Desta forma, optou-se pela utilização de um equivalente de rede para representar o SEP.

Para o cálculo deste circuito equivalente, foram simuladas situações de curtos-circuitos monofásico e trifásico no lado primário do transformador TR1A, para que a partir destes dados, o valor da impedância equivalente pudesse ser obtido por meio das seguintes fórmulas:

$$z_{1(pu)} = \frac{1}{I_{3f(pu)}} \quad (20)$$

$$z_{0(pu)} = \frac{3}{I_{1f(pu)}} - \frac{2}{I_{3f(pu)}} \quad (21)$$

Onde,

$z_{1(pu)}$: impedância de sequência positiva em pu;

$z_{0(pu)}$: impedância de sequência zero em pu;

$I_{1f(pu)}$: corrente de falta monofásica em pu; e

$I_{3f(pu)}$: corrente de falta trifásica em pu.

Os valores obtidos a partir das simulações citadas foram:

- $I_{1f} = 565,7 \text{ A}$;
- $I_{3f} = 487,8 \text{ A}$.

A corrente base pode ser obtida por:

$$I_{base} = \frac{S_{base}}{\sqrt{3} \cdot V_{base}} \quad (22)$$

Onde, a potência de base (S_{base}) e a tensão de base (V_{base}) valem, respectivamente, 90 MVA e 138 kV neste caso. Assim, I_{base} apresenta um valor calculado de 376,53 A.

Portanto, em pu, os valores das correntes de curto-circuito monofásica e trifásica são:

$$I_{1f(pu)} = \frac{I_{1f}}{I_{base}} = \frac{565,70}{376,53} = 1,50 \text{ pu} \quad (23)$$

$$I_{3f(pu)} = \frac{I_{3f}}{I_{base}} = \frac{487,81}{376,53} = 1,30 \text{ pu} \quad (24)$$

Utilizando estes valores obtidos juntamente com as fórmulas, chegamos aos seguintes valores de impedância de sequência positiva e zero para o equivalente de rede do sistema em pu:

- $Z_{1(pu)} = 0,77 \text{ pu};$
- $Z_{0(pu)} = 0,46 \text{ pu}.$

A impedância base do sistema pode ser calculada da seguinte maneira:

$$Z_{base} = \frac{V_{base}^2}{S_{base}} \quad (25)$$

Utilizando os mesmos valores de tensão (V_{base}) e potência de base (S_{base}) do cálculo da corrente base, obtém-se que a impedância base (Z_{base}) vale 211,6 Ω .

Desta forma, os valores reais das impedâncias de sequência positiva e zero são:

$$Z_1 = Z_{1(pu)} \cdot Z_{base} = 0,77 \cdot 211,6 = 162,93 \Omega \quad (26)$$

$$Z_0 = Z_{0(pu)} \cdot Z_{base} = 0,46 \cdot 211,6 = 97,34 \Omega \quad (27)$$

Consequentemente, estes foram os valores empregados para representar a modelagem do equivalente de rede do sistema anteriormente apresentado.

Já o transformador abaixador ilustrado no sistema é o próprio TR1A mantido do sistema anterior.

Os parâmetros dos trechos da rede deste alimentador de 90 barras foram modelados por valores característicos da resistência e indutância, considerando-se assim, trechos RL e conectados em estrela. Como, por exemplo, a Figura 17 ilustra o caso de um destes trechos apontando sua extensão, tipo de cabo, resistência de sequência zero, indutância de sequência zero, resistência de sequência positiva e indutância de sequência positiva.

Component: LINESY_3

Attributes

DATA	UNIT	VALUE
R ₀	Ohm/m	0.3638
L ₀	mH/m	5.5642
R ₊	Ohm/m	0.1876
L ₊	mH/m	1.0271

NODE	PHASE	NAME
IN1	ABC	SUB
OUT1	ABC	X0066

Copy Paste entire data grid Reset Order: 0 Label: A33

Comment: Cabo A33 - 0.4825km

Lines
Length 0.4825 [m] ☐ Hide

Edit definitions OK Cancel Help

Figura 17 - Modelagem de um trecho do alimentador de distribuição.

Todos os consumidores foram modelados como cargas de potência constante e conectados em delta, como mostra a Figura 18, onde o consumidor instalado foi modelado por meio de suas resistências e indutâncias trifásicas.

Component: RLCD3

Attributes

DATA	UNIT	VALUE
R_1	Ohms	3272
L_1	mH	0.0036973
C_1	μ F	0
R_2	Ohms	3272
L_2	mH	0.0036973
C_2	μ F	0
R_3	Ohms	3272
L_3	mH	0.0036973

NODE	PHASE	NAME
IN	ABC	X0068

Copy Paste entire data grid Reset Order: 0 Label:

Comment: Carga

Output
0 - No

☐ Hide
☐ \$Vintage,1

Edit definitions OK Cancel Help

Figura 18 - Modelagem de um consumidor conectado ao alimentador de distribuição.

O sistema ainda possui dois bancos de capacitores trifásicos com conexão delta-estrela aterrado, sendo modelados como exibido na Figura 19.

Component: RLCY3

Attributes

DATA	UNIT	VALUE
R_1	Ohm	0
L_1	mH	0
C_1	μ F	5.96521
R_2	Ohm	0
L_2	mH	0
C_2	μ F	5.96521
R_3	Ohm	0
L_3	mH	0

NODE	PHASE	NAME
IN	ABC	X0017
OUT	1	

Copy Paste entire data grid Reset Order: 0 Label:

Comment: Banco de Capacitores BC1

Output
0 - No

☐ Hide
☐ \$Vintage,1

Edit definitions OK Cancel Help

Figura 19 - Modelagem de um banco de capacitor conectado ao alimentador de distribuição.

Os modelos de cargas não lineares utilizados referem-se a um retificador trifásico em ponte e um forno a arco elétrico (FEA), sendo que para ambas as cargas foi necessária a utilização de um transformador delta-estrela aterrado, com resistência de aterramento nula e *tap* ajustado em 13.800/220 V e 13.200/825 V, respectivamente, para reduzir a tensão que alimenta estas cargas. Todas as informações sobre estes transformadores podem ser encontrados em GARCIA (2010).

Sobre o retificador trifásico em ponte é comumente encontrado em aplicações de alta potência que tem como função converter um sinal CA em um sinal unidirecional, gerando, consequentemente, correntes harmônicas. O modelo do retificador utilizado neste trabalho pode ser encontrado em MOHAN (1990). Já os parâmetros utilizados para os componentes do circuito, podem ser observados em GARCIA (2010).

O FEA é um equipamento muito utilizado na produção de aço de alta qualidade e foi escolhido, visto que, durante a sua operação, a resistência do arco, e, portanto, as características de tensão e corrente, são continuamente variadas devido ao movimento da sucata. O resultado é a não linearidade do arco e dos parâmetros do forno a arco, resultando na geração de tensões harmônicas (HORTON, 2009). Todo o desenvolvimento do modelo proposto e aqui utilizado para o FEA pode ser encontrado em GARCIA (2010).

4.2 Simulações computacionais

Inicialmente, com respeito às condições de operação do equipamento, serão geradas situações sobre o transformador TR1A: faltas internas, sobre-excitação, energização em vazio e situações de energização sob falta interna, como executado em BRANCO (2009). Posteri-

ormente, serão acrescentadas situações de energização sob carga. Serão, também, simuladas faltas próximas aos TCs, de modo a caracterizar o fenômeno da saturação dos TCs.

Além destas situações, agora em relação aos fenômenos de QEE, serão simuladas situações na tentativa de gerar eventos como afundamento, elevação, desequilíbrio, distorção harmônica e flutuação da forma de onda da tensão.

Desta maneira, acredita-se que poderá ser verificada a influência destes eventos sobre a atuação da proteção diferencial, na presença ou não das cargas não lineares anteriormente apresentadas, bem como o impacto destas manobras para o sistema primário da concessionária.

4.2.1 Condições de operação do transformador

Aqui é descrito como foram simuladas as condições de operação do transformador que foram utilizadas neste trabalho no intuito de verificar ou não a ocorrência de correntes diferenciais. Cabe lembrar que, apesar de apenas um exemplo de cada tipo de condição ser ilustrado, um banco de dados para cada situação foi evidenciado, por meio de programas de simulação automáticos desenvolvidos em linguagem C++ (DEITEL e DEITEL, 2001), (SCHILDT, 1996), de maneira a conduzir de uma forma mais representativa este estudo.

4.2.1.1 Faltas internas

Para a simulação de curtos-circuitos internos ao transformador, os enrolamentos primário e secundário do transformador TR1A foram divididos em porções entre as fases “A” e “B”. Tais porções correspondem a 5%, 10%, 30%, 50% e 80% do total dos valores de resis-

tências, indutâncias e tensão relativas ao terra. A Figura 20 exibe como estas partições dos enrolamentos foram organizadas.

Exemplificando, a aplicação de uma falta no nó N10E2A, a partir do fechamento da chave correspondente, resultará em uma falta aplicada a 10% do enrolamento. Enquanto, para a aplicação de uma falta no nó N50E2A resultará em uma falta a 50% do enrolamento e assim, analogamente para os demais nós.

As faltas internas que serão caracterizadas em ambos os lados do transformador são dos tipos fase-terra, fase-fase ou entre enrolamentos de uma mesma fase, buscando variar a porcentagem do enrolamento envolvido na falta e o ângulo de inserção da mesma em ambos os lados do transformador TR1A.

Figura 20 - Partições do enrolamento primário para situações de faltas internas.

Adaptado de (Bernardes, 2006).

A Figura 21 apresenta o trecho do código do ATP onde são inseridas as chaves no lado primário do transformador que estão inicialmente abertas caracterizando a situação de regime permanente. Sendo a simulação de um determinado tipo de falta realizada por meio do fechamento da chave relacionada à falta que se pretende aplicar no instante de tempo correspondente ao ângulo de inserção pretendido. Para o outro lado do transformador, as faltas são simuladas da mesma maneira.

Na Figura 22 estão ilustradas as formas de onda da corrente no primário do transformador para um exemplo de situação de falta interna aplicada ao secundário do transformador TR1A entre as fases "A" e "B" com envolvimento de 5% do enrolamento e ângulo de incidência de 270°.

```

C -----
C CHAVES PARA FALTAS INTERNAS FAG NO TRAF0 4 - Y - PRIMÁRIO - LV
C -----
N80E1A      1.00E+04 2.000E+04 0.000E+00      0
N50E1A      1.00E+04 2.000E+04 0.000E+00      0
N30E1A      1.00E+04 2.000E+04 0.000E+00      0
N10E1A      1.00E+04 2.000E+04 0.000E+00      0
N05E1A      1.00E+04 2.000E+04 0.000E+00      0
C -----
C CHAVES PARA FALTAS INTERNAS ENTRE FASES NO TRAF0 4 - Y - PRIMÁRIO - LV
C -----
C < N 1>< N 2>< TCLOSE ><TOP/TDE >< IE ><VF/CLOP >< TYPE >
N80E1AN80E1B 1.00E+04 2.000E+04 0.000E+00      0
N50E1AN50E1B 1.00E+04 2.000E+04 0.000E+00      0
N30E1AN30E1B 1.00E+04 2.000E+04 0.000E+00      0
N10E1AN10E1B 1.00E+04 2.000E+04 0.000E+00      0
N05E1AN05E1B 1.00E+04 2.000E+04 0.000E+00      0
C -----
C CHAVES PARA FALTAS INTERNAS ENTRE ESPIRAS NO TRAF0 4 - Y - PRIMÁRIO - LV
C -----
C < N 1>< N 2>< TCLOSE ><TOP/TDE >< IE ><VF/CLOP >< TYPE >
N80E1AN50E1A 1.00E+04 2.000E+04 0.000E+00      0
N50E1AN30E1A 1.00E+04 2.000E+04 0.000E+00      0
N30E1AN10E1A 1.00E+04 2.000E+04 0.000E+00      0
N10E1AN05E1A 1.00E+04 2.000E+04 0.000E+00      0
N50E1AN10E1A 1.00E+04 2.000E+04 0.000E+00      0
N30E1AN05E1A 1.00E+04 2.000E+04 0.000E+00      0
C -----

```

Figura 21 - Trecho do arquivo ATP com as chaves utilizadas para a aplicação de faltas internas no primário do transformador TR1A.

Figura 22 - Corrente trifásica observada para uma falta interna aplicada ao secundário de TR1A entre as fases "A" e "B", com envolvimento de 5% do enrolamento e ângulo de incidência de 270° .

4.2.1.2 Energização em vazio

Para gerar as situações de energização a vazio foram inseridas duas chaves, inicialmente abertas, uma entre a barra BLT10 e o transformador TR1A, e outra entre o transformador TR1A e a barra BGCH1. Sendo assim, a primeira chave, ligada ao primário do transformador, foi fechada em certo instante de tempo dando início a energização do transformador e a outra, ligada ao secundário, mantida aberta. Para a geração de vários casos, a primeira chave foi fechada em instantes de tempo diferentes, variando-se o ângulo de inserção da energização. As formas de onda da corrente no primário do transformador para um exemplo de situação de energização em vazio do transformador TR1A com ângulo de incidência de 270° é exibido na Figura 23.

Figura 23 - Corrente trifásica observada para uma energização em vazio de TR1A com ângulo de incidência de 270°.

4.2.1.3 Energização sob carga

Agora, no caso das situações de energização sob carga, as mesmas duas chaves foram inseridas nos mesmos locais do caso das situações da energização em vazio. Porém, neste caso, a segunda chave, ligada ao lado secundário do transformador, será mantida sempre fechada, caracterizando a conexão permanente com a carga. Para a geração de vários casos, como no caso da energização em vazio, a primeira chave foi fechada em instantes de tempo diferentes, variando-se o ângulo de inserção da energização. Como no exemplo anterior, as formas de onda da corrente no primário do transformador para uma situação de energização, agora sob carga do transformador TR1A com ângulo de incidência de 270°, pode ser observado na Figura 24.

Figura 24 - Corrente trifásica observada para uma energização sob carga de TR1A com ângulo de incidência de 270° .

4.2.1.4 Energização sob falta interna

As situações de energização sob falta interna também foram simuladas no transformador TR1A. Para isto, uma das chaves que particionam os enrolamentos do transformador encontra-se fechada, caracterizando uma situação de falta, antes mesmo do início da energização. Neste sentido, a chave que se encontra fechada diz respeito ao tipo de falta aplicada. Na Figura 25 estão ilustradas as formas de onda da corrente no primário do transformador para uma situação de energização em vazio com ângulo de incidência de 270° sob uma falta interna entre as fases "A" e "B" aplicada ao lado secundário do transformador TR1A, e com 5% do enrolamento envolvido.

Figura 25 - Corrente trifásica observada para uma energização de TR1A com ângulo de incidência de 270° sob uma falta interna entre as fases "A" e "B", aplicada ao lado secundário do transformador e com 5% do enrolamento envolvido.

4.2.1.5 Sobre-excitação

Outra situação considerada foi a sobre-excitação do transformador TR1A. Para caracterizar tal situação, foi elevada a tensão da fonte de alimentação até certa porcentagem do seu valor nominal. A Figura 26 mostra as formas de onda da corrente no primário do transformador para uma situação de sobre-excitação com a fonte tendo sua tensão aumentada a 170% de seu valor nominal.

Figura 26 - Corrente trifásica observada para uma sobre-excitação de 170% do valor nominal da tensão de alimentação.

4.2.1.1 Falta externa

As situações de falta externa ao transformador TR1A foram simuladas buscando evidenciar o fenômeno da saturação do TC. Para isto, foi posicionada uma chave para cada fase próxima ao TC do secundário do transformador, caracterizando a situação faltosa. Assim sendo, a chave que se encontrar fechada diz respeito ao tipo de falta aplicada. Na Figura 27 estão ilustradas as formas de onda da corrente no primário do transformador para uma situação de falta externa trifásica com ângulo de incidência de 270° aplicada ao lado secundário do transformador TR1A.

Vale comentar que poucos casos de falta externa ao transformador TR1A resultaram na real saturação do TC. Assim, por preservar a idoneidade das simulações realizadas, apenas estes poucos casos obtidos é que serão utilizados no treinamento das RNA no Capítulo 5.

Figura 27 - Corrente trifásica observada para uma falta externa com ângulo de incidência de 270° , aplicada ao secundário do transformador TR1A.

4.2.1 Fenômenos de QEE

A seguir são apresentados os fenômenos de QEE que foram considerados durante este trabalho para verificação ou não da ocorrência de correntes diferenciais em relação à proteção do transformador de potência TR1A.

Vale comentar que para os casos de afundamento, elevação e desequilíbrio de tensão, um único caso simulado será utilizado para ilustrar os três fenômenos, já que este consta dos três distúrbios simultaneamente. Porém, um banco de dados com variações de parâmetros para cada situação também foi criado para uma melhor visualização de cada caso. O mesmo vale para os casos de distorção harmônica e flutuação de tensão.

Para gerar alguns distúrbios de QEE (afundamento, elevação e desequilíbrio de tensão), curtos-circuitos foram aplicados ao longo do alimentador de distribuição citado anteriormente. Desta forma, quatro tipos de faltas foram aplicados a partir de certo instante de tempo (monofásica, bifásica, com e sem o envolvimento da terra, e trifásica). Além disso, dois

valores de resistência de falta foram utilizados nas simulações (0 e 40 Ω). Os locais de aplicação da falta também foram variados e cinco pontos foram escolhidos e estão apontados na Figura 28, juntamente com sua distância em relação ao transformador TR1A. Com isto, a severidade dos distúrbios de QEE pôde ser mapeada, gerando um banco de dados maior para o estudo relativo à QEE do SEP em análise.

Figura 28 - Locais de aplicação dos curtos-circuitos no alimentador de distribuição.

A forma de onda da tensão da fase "B" no secundário do transformador TR1A para uma falta aplicada em L₁, no instante 0,1 s, e envolvendo a fase "A" e o terra, com resistência nula é exibida na Figura 29. Conforme observado na figura, a partir da inserção da situação de falta sobre o sistema, ficou caracterizado um afundamento de tensão de 64%, quando considerado o valor de tensão eficaz nominal.

Figura 29 - Afundamento de tensão no secundário do transformador TR1A.

Já na Figura 30, a forma de onda da tensão da fase "C" no secundário do transformador TR1A para a mesma situação anterior é exibida. A partir do instante 0,1 s fica caracterizada uma elevação de 48% em relação ao valor eficaz da tensão nominal.

Para ilustrar o fenômeno de desequilíbrio de tensão, as formas de onda das tensões trifásicas no secundário do transformador TR1A, ainda para a mesma situação faltosa, é exibida na Figura 31. Desta maneira, a partir do instante 0,1 s fica caracterizado um desequilíbrio de 108,4 % nas formas de ondas das tensões trifásicas apresentadas.

Figura 30 - Elevação de tensão no secundário do transformador TR1A.

Figura 31 - Desequilíbrio de tensão no secundário do transformador TR1A.

Por meio da utilização do retificador trifásico em ponte conectado ao longo do alimentador de distribuição foi realizada uma tentativa de geração do fenômeno da distorção harmônica da tensão no secundário do transformador TR1A. Para isto, variou-se entre os cinco lo-

cais apontados na Figura 28 a alocação deste equipamento, buscando, desta forma, variar a severidade da distorção da forma de onda da tensão. Vale comentar que a distorção da forma de onda da tensão foi observada apenas no lado secundário do transformador de conexão do próprio retificador quando aplicado no local mais próximo a TR1A (L_1), como pode ser observado na Figura 32. A distorção harmônica total da forma de onda da tensão neste caso foi de 28,5%.

Figura 32 - Tensões trifásicas observadas no secundário do transformador de conexão do retificador.

Devido à baixa potência de curto-circuito da barra na qual o retificador está conectado, em comparação com a barra do lado primário deste mesmo transformador, as formas de onda da tensão refletida para o lado primário do transformador de conexão, praticamente, não sofrem nenhuma distorção, mantendo uma assinatura próxima da senoidal para as três fases, que são ilustradas na Figura 33, com uma DHT de apenas 0,6%.

Figura 33 - Tensões trifásicas observadas no primário do transformador de conexão do retificador.

Desta forma, as formas de onda da tensão apresentadas no secundário do transformador TR1A, praticamente, também não sofrem alterações a partir da conexão do retificador ao sistema, como exibido na Figura 34, apresentando uma DHT também de 0,6%.

Figura 34 - Tensões trifásicas observadas no secundário do transformador TR1A.

Vale ressaltar também que, apesar de não ser refletida, a distorção nas formas de onda da tensão para o primário, todos os outros equipamentos que vierem a ser conectados no secundário deste transformador de conexão serão alimentados pela forma de onda da tensão comprometida ilustrada na Figura 32.

Ainda, como o que define a assinatura da forma de onda das correntes trifásicas é o tipo de carga que esta alimenta, pelos espectros de frequência das correntes no primário e secundário do transformador de conexão (Figuras 35 e 36) constata-se a inserção na rede por parte do retificador de harmônicos ímpares e não múltiplos de três (5° , 7° , 11° , 13° , etc.), ou seja, confere com o encontrado na literatura, já que para este tipo de dispositivo a ordem das correntes harmônicas presentes são dadas por:

$$n = k \cdot q \pm 1 \quad (28)$$

Onde:

n é a ordem harmônica;

k é qualquer número inteiro positivo; e

q é o número de pulsos do retificador.

Figura 35 - Espectro de frequência das correntes no primário do transformador de conexão.

Figura 36 - Espectro de frequência das correntes no secundário do transformador de conexão.

Por meio da utilização do FEA conectado ao longo do alimentador de distribuição foi realizada a tentativa de geração do fenômeno da flutuação de tensão no secundário do transformador TR1A. Para isto, também se variou entre os cinco locais apontados na Figura 28 para a alocação deste equipamento, buscando, desta forma, variar a severidade da flutuação da forma de onda da tensão.

Porém, como no caso da distorção da forma de onda da tensão, a flutuação de tensão foi mais bem observada apenas no lado secundário do transformador de conexão do próprio FEA quando aplicada em L_1 , como pode ser observado na Figura 37. Estas formas de onda apresentam componentes harmônicos de ordem elevada, que podem prejudicar o funcionamento de equipamentos conectados a este ponto de acoplamento.

Figura 37 - Tensões trifásicas observadas no secundário do transformador de conexão do FEA.

Como no caso do retificador, as tensões no lado primário (Figura 38) não sofrem distorções, devido também à baixa potência de curto-circuito da barra na qual este equipamento está conectado em comparação com a barra do lado primário deste mesmo transformador.

Figura 38 - Tensões trifásicas observadas no primário do transformador de conexão do FEA.

Assim, as formas de onda da tensão apresentadas no secundário do transformador TR1A, praticamente, também não sofrem alterações a partir da conexão do FEA ao SEP, como exibido na Figura 39.

Figura 39 - Tensões trifásicas observadas no secundário do transformador TR1A.

Como dito anteriormente o que define a forma de onda das correntes trifásicas é a carga alimentada, então, pela análise dos espectros de frequência da corrente no secundário do transformador de conexão (Figuras 40 e 416), nota-se uma considerável presença de sub-harmônicos, que proporciona uma das características deste fenômeno que é a modularização da forma de onda. Porém, por se tratar de um fenômeno imprevisível devido à variação aleatória do arco elétrico, como citado em GARCIA (2010), torna-se difícil uma análise mais exata sobre a predominância de outras ordens harmônicas. Ainda assim, é possível observar a presença de harmônicos de ordem par e ímpar, que vão diminuindo conforme a ordem eleva-se.

Figura 40 - Espectro de frequência das correntes no primário do transformador de conexão.

Figura 41 - Espectro de frequência das correntes no secundário do transformador de conexão.

Com as simulações computacionais compreendidas, o próximo passo é explicar como foi implementado o algoritmo computacional do *software*. Para isto, a metodologia completa do trabalho será apresentada no próximo capítulo.

5. PROCEDIMENTOS E O ALGORITMO IMPLEMENTADO

As principais ferramentas computacionais utilizadas nesta pesquisa foram: o *software* ATP (PRIKLER e HOIDALEN, 1997), como ilustrado no Capítulo 4, por meio do qual foram feitas as simulações de interesse do sistema elétrico modelado; a linguagem de programação C++ (DEITEL e DEITEL, 2001), (SCHILDT, 1996) com a qual foi implementado o algoritmo proposto; e o *software* Matlab utilizado para fornecer a saída gráfica do programa.

Ainda para o desenvolvimento do trabalho, foram utilizadas algumas técnicas inteligentes. Neste sentido, foi feito um estudo detalhado da TW e da LF, além de uma revisão bibliográfica sobre métodos que utilizam tais técnicas para a realização da proteção de transformadores e estudos relacionados à QEE. Posteriormente, um estudo sobre metodologias que utilizam RNA para tratar da saturação de TC também foi realizado.

Cabe enfatizar que as simulações computacionais fizeram parte de uma importante etapa desenvolvida neste trabalho, uma vez que estas foram responsáveis por gerar os dados necessários ao processamento e avaliar o algoritmo proposto.

5.1 Descrição metodológica

A Figura 42 ilustra, de uma maneira geral, como se desenvolveu e será apresentada a metodologia da pesquisa, denotando os blocos do algoritmo implementado por BRANCO (2009) e os que foram posteriormente acrescentados.

Inicialmente, realiza-se a geração das situações de interesse por meio de simulações computacionais, como, por exemplo, as de afundamento, elevação e desequilíbrio de tensão e chaveamento de blocos de cargas não lineares, observando a influência destas sobre a correta operação da proteção dos transformadores. Vale adiantar que foram também simuladas e ob-

servadas as várias situações relacionadas com a proteção deste equipamento e como estas interferem na QEE refletida ao lado de alta do transformador.

O bloco *Aquisição e Pré-processamento* (Figura 42) representa todo o processo de aquisição e de digitalização dos sinais implementado por BRANCO (2009), considerando as características relevantes de um relé comercial pelo emprego de TC e TP, filtragem analógica, conversão para o formato COMTRADE (IEEE Standard Common Format for Transient Data Exchange (COMTRADE) for Power Systems, 1999), conversão analógico-digital (12 bits) e a normalização do sinal amostrado.

Figura 42 - Fluxograma do algoritmo completo implementado.

Posteriormente, verifica-se a ocorrência da saturação dos TC. Em caso afirmativo, a forma de onda da corrente é corrigida. Justifica-se tal necessidade, visto que os TC são fundamentais para a aquisição e uma correta representação dos valores trifásicos das correntes observadas.

Em caso de que, mesmo após a correção da forma de onda da corrente, forem constatadas correntes diferenciais, identificam-se as origens, podendo ser provenientes de falta interna ou de outra situação para qual a proteção do transformador não deveria atuar. No caso da corrente diferencial proveniente de uma falta interna, o algoritmo de proteção, que não é objetivo desta pesquisa, deve comandar a abertura dos disjuntores. Caso contrário, o algoritmo implementado nesta pesquisa deve apontar qual evento a ocasionou. Dentre os possíveis eventos, têm-se: energização em vazio, energização sob carga, energização sob falta interna e de sobre-excitação do transformador.

Em seguida, realiza-se uma análise sobre as discontinuidades observadas nas formas de onda das tensões e correntes medidas junto ao transformador. Um novo bloco é considerado. Este será responsável pela observação das relações entre os fenômenos associados à proteção do transformador e sua influência para a QEE. A análise também se aplica com o objetivo de quantificar o nível dos distúrbios associados à falta da QEE observado no lado de alta do transformador que tenha sido originado pelos consumidores conectados no lado de baixa. Para esta análise, observam-se as formas de ondas das tensões e correntes trifásicas.

Cabe frisar que tal estudo será de grande utilidade não só para a QEE, como também para uma análise da situação atual de operação do sistema e para o entendimento das causas e/ou consequências de certos distúrbios, bem como da propagação destes que são oriundos dos consumidores para o restante do SEP.

5.2 Tratamento do fenômeno da saturação dos TCs

Nesta etapa do trabalho, o fenômeno da saturação dos TCs foi abordado e tratado computacionalmente. Como passo inicial, o objetivo foi detectar a forma de onda distorcida que pode vir a provocar a operação indesejável dos dispositivos de proteção. Posteriormente,

foi então escolhido um método computacional de compensação para esta forma de onda distorcida do secundário, no caso RNA, sendo tomados como base os trabalhos de MONARO *et al.* (2010) e de BARBOSA (2010).

Neste contexto, apenas depois desta forma de onda distorcida ser corrigida é que a mesma será direcionada às outras etapas subsequentes do algoritmo proposto.

Cabe lembrar que o sistema de proteção deve responder pela segurança do transformador mediante somente a uma falta interna e, por exemplo, para situações de energização e faltas externas e próximas à sua área de atuação que podem provocar a saturação dos TC, manter-se inativo. Desta maneira, ao detectar um distúrbio, o algoritmo deve antes de tudo questionar se aquela forma de onda se encontra distorcida devido à saturação do TC. Em caso afirmativo, o algoritmo de compensação da forma de onda deve atuar e, posteriormente, a corrente será disponibilizada para a classificação e respectivo relatório. Agora, caso a forma de onda não esteja distorcida, a classificação do distúrbio ocorrerá diretamente de acordo com os eventos já incluídos no algoritmo, sem passar pelo módulo de compensação. Neste sentido, para cada fase do secundário e a ser processada existe uma RNA associada para a detecção, e outra para a correção quando da existência da situação de saturação do TC. Ou seja, utilizam-se seis conjuntos de RNA operando em paralelo.

Desta maneira, foram utilizadas duas arquiteturas de RNA do tipo *Multi-Layer Perceptron* (MLP) com finalidades distintas (MONARO *et al.*, 2010). Sendo a primeira utilizada no processo de detecção da saturação do TC e a segunda para a correção da forma de onda saturada.

Vale comentar que a RNA corretora será somente solicitada quando houver saturação do TC, possibilitando um melhor desempenho do algoritmo desenvolvido, evitando a inserção de imprecisões adicionais às formas de onda.

Rede Detectora

A rede detectora funciona com o reconhecimento de padrões de correntes distorcidas pela saturação do TC. Como em MONARO *et al.*, (2010), a topologia utilizada é formada por duas camadas neurais. A camada de entrada deste trabalho contém 34 entradas, das quais 32 são amostras do sinal de corrente da janela de dados atual, sendo as outras duas referentes ao somatório das amostras de cada um dos dois ciclos anteriores a este. Esta escolha se deve ao fato de que o comportamento do TC em um dado ciclo é dependente dos ciclos anteriores. De acordo com os testes realizados em MONARO *et al.*, (2010) esta escolha melhora significativamente o desempenho da rede.

A camada neural escondida possui 33 neurônios, e a camada de saída apresenta apenas um neurônio responsável pela indicação da saturação ou não do TC. A topologia da rede detectora é mostrada na Figura 43. A função de ativação empregada em todos os neurônios foi a tangente hiperbólica, com coeficiente $\beta = 1$. O algoritmo de treinamento empregado foi o *backpropagation* com fator de momentum $\alpha = 0,3$ e taxa de aprendizagem $\eta = 0,4$. Cabe comentar também que 10.483 padrões foram utilizados durante o treinamento e um total de 4.492 padrões no processo de validação.

Figura 43 - Topologia da RNA detectora.

A topologia escolhida (34-33-1) para a RNA detectora apresentou uma taxa de acerto de 98,51% para os 4.492 dados de validação utilizados. A Figura 44 ilustra a resposta da RNA detectora para um dos padrões de validação.

Figura 44 - Resposta da RNA detectora para um dos padrões de validação.

Rede Corretora

A RNA corretora funciona como um aproximador funcional que faz o papel inverso da curva de saturação do TC. Como em MONARO *et al.*, (2010) utilizou-se uma topologia com três camadas neurais. A camada de entrada contém 34 entradas, sendo estas as mesmas apresentadas para a rede detectora.

A primeira camada neural escondida possui 20 neurônios, e a segunda camada neural escondida conta com cinco neurônios. A camada neural de saída possui um único neurônio, o qual fornece a corrente corrigida. A topologia da rede corretora é mostrada na Figura 45. A função de ativação empregada em todos os neurônios foi a tangente hiperbólica com coefici-

ente $\beta = 1$. O algoritmo de treinamento empregado foi o *backpropagation* com fator de momentum $\alpha = 0,8$ e taxa de aprendizagem $\eta = 0,01$. Também para esta rede neural, 10.483 padrões foram utilizados durante o treinamento e um total de 4.492 padrões no processo de validação.

Figura 45 - Topologia da RNA corretora.

É importante salientar que a RNA corretora (34-20-5-1) obteve um erro absoluto médio de 2,78 A na aproximação funcional para os dados de validação. A Figura 46 apresenta o resultado proveniente da RNA corretora para um padrão de validação após o treinamento.

Figura 46 - Resposta da RNA corretora para um padrão de validação.

5.3 O algoritmo de proteção e monitoramento proposto

Como notado na descrição das condições de operação do transformador de potência, apenas a observação do conteúdo de segundo harmônico para verificar a necessidade ou não da atuação da proteção é insuficiente. Desta maneira, foi desenvolvido um algoritmo de proteção e monitoramento na tentativa de se sobrepor este problema, realizando a detecção e a classificação das ocorrências transitórias relacionadas com a proteção de transformadores em tempo real.

A Figura 47 ilustra o fluxograma do algoritmo de proteção e monitoramento implementado a cada uma das três fases do sistema de forma independente, após o tratamento do fenômeno da saturação de TCs, caso seja necessário. Posteriormente é tomada a decisão sobre a ocorrência do evento, avaliando-se as respostas de cada uma das fases em conjunto.

Figura 47 - Fluxograma do algoritmo de proteção e monitoramento proposto.

Os dois primeiros blocos do fluxograma correspondem à aquisição e ao condicionamento dos dados. Para simular a aquisição de dados em tempo real, ilustrado pelo bloco 1, considera-se uma janela correspondente a um ciclo dos sinais em análise, definida na frequência fundamental do sistema, para que sejam direcionados ao algoritmo proposto. Esta janela tem um deslocamento amostra-a-amostra sobre os sinais, e a cada movimento é realizado o condicionamento dos dados provenientes dos TC (bloco 2). Os sinais de corrente são filtrados por um filtro passa-baixa com uma frequência de corte de 480 Hz e reamostrados a uma taxa de 16 amostras por ciclo da frequência fundamental. Neste ponto, elimina-se a componente de sequência zero e se corrige a defasagem entre as formas de onda do primário e secundário do transformador (BRANCO, 2009).

As formas de onda das correntes medidas nos dois lados do transformador originadas das simulações computacionais via o *software* ATP são os dados de entrada fornecidos ao algoritmo.

Após o condicionamento dos sinais de entrada, encontra-se a corrente diferencial (I_d) e a corrente de restrição (I_r) de acordo com as fórmulas do bloco 3 do fluxograma, onde I_p e I_s representam as correntes no lado primário e secundário do transformador, respectivamente.

Processa-se então a Transformada *Wavelet Packet* (TWP) de quarto nível destas formas de onda, com o intuito de se obter as informações sobre os componentes harmônicos presentes nos sinais.

A referência (BARROS e DIEGO, 2006) ilustra a utilização da TW para análises relacionadas à SEP. Neste trabalho, os autores desenvolveram uma metodologia que fornece informações sobre os múltiplos da frequência fundamental de ordem ímpar presentes em um sinal elétrico. Para aplicação do algoritmo aqui proposto, adaptou-se a metodologia apresentada de modo que também seja possível obter os componentes de ordem par como feito em BRANCO (2009). Já a biblioteca da TW utilizada neste trabalho foi a mesma utilizada em (GUIDO, PEREIRA e SLAETS, 2009), elaborada em linguagem de programação C.

Após o processamento das correntes I_d e I_r pela TWP é possível encontrar as variáveis que servirão de entrada para o SF, representado pelo bloco 5 do fluxograma.

O SF apresenta três entradas, sendo que a primeira entrada (I_{dF}/I_{rF}) corresponde a razão entre o valor eficaz do harmônico de primeira ordem (componente fundamental) de I_d e de I_r . A segunda e terceira entrada (I_{d2} e I_{d5}) referem-se aos conteúdos de segundo e quinto harmônico presentes em I_d , respectivamente. Vale comentar que a família de filtros utilizada para a obtenção das entradas do SF foi a *Daubechies* 20 (Db20), pois com esta foi possível realizar os melhores ajustes das regras *fuzzy* e obter os melhores resultados durante os testes.

O SF propriamente dito se refere ao bloco 6 da Figura 47. Este tem a responsabilidade de classificar a condição de operação que ocorreu no transformador em estudo a partir das entradas apresentadas pelo bloco anterior.

A Figura 48 ilustra as variáveis linguísticas de entrada do SF e a variável de saída *fuzzy* utilizadas. É possível observar na figura que as variáveis *fuzzy* de entrada são compostas por dois termos *fuzzy*: Baixa e Alta, cujas funções de pertinência são retangulares. Já a variável de saída é composta por quatro conjuntos *fuzzy* unitários (*singletons*) que definem a condi-

ção transitória de operação a ser classificada, que neste caso são: Regime (RE), Energização em vazio (EV), Sobre-Excitação (SE) e Falta Interna (FI).

Figura 48 - Funções de pertinência.

Desta forma, torna-se possível a caracterização de oito regras de inferência. As quais são:

1. **Se** (I_d/I_r É Baixa) **E** (I_{d2} É Baixa) **E** (I_{d5} É Baixa) **Então** (Tipo É RE).
2. **Se** (I_d/I_r É Baixa) **E** (I_{d2} É Baixa) **E** (I_{d5} É Alta) **Então** (Tipo É SE).
3. **Se** (I_d/I_r É Alta) **E** (I_{d2} É Baixa) **E** (I_{d5} É Alta) **Então** (Tipo É SE).
4. **Se** (I_d/I_r É Alta) **E** (I_{d2} É Alta) **E** (I_{d5} É Baixa) **Então** (Tipo É EV).
5. **Se** (I_d/I_r É Alta) **E** (I_{d2} É Alta) **E** (I_{d5} É Alta) **Então** (Tipo É EV).
6. **Se** (I_d/I_r É Baixa) **E** (I_{d2} É Alta) **E** (I_{d5} É Baixa) **Então** (Tipo É EV).
7. **Se** (I_d/I_r É Baixa) **E** (I_{d2} É Alta) **E** (I_{d5} É Alta) **Então** (Tipo É EV).
8. **Se** (I_d/I_r É Alta) **E** (I_{d2} É Baixa) **E** (I_{d5} É Baixa) **Então** (Tipo É FI).

É importante ressaltar que as variáveis de entrada, as funções de pertinência e as regras de inferência foram definidas através de um conhecimento prévio sobre os conteúdos espectrais das diversas situações estudadas e inúmeros testes realizados até serem alcançados os ajustes apresentados.

Neste trabalho, o operador de implicação MAX-MIN foi utilizado por apresentar menor esforço computacional e um rápido processamento quando comparado aos demais operadores (ZIMMERMANN, 2001).

Para o procedimento de defuzzificação foi aplicada a técnica do último máximo, que fornece como resposta o maior valor do domínio com máximo valor do grau de pertinência ao conjunto de saída.

Cabe comentar também que a concepção deste SF foi baseada em uma implementação do padrão IEC 61131-7 (IEC, 2000), que trata da programação de aplicações de controle *fuzzy* em Controladores Lógicos Programáveis (CLP), sendo a biblioteca utilizada neste caso a *Free Fuzzy Logic Library* (FFLL, 2002).

O último bloco da Figura 47 é responsável pela classificação da condição de operação por meio das saídas do SF aplicadas a cada uma das fases do transformador, para que se tenha uma única indicação.

No caso de um apontamento de falta interna em alguma das três fases do transformador analisado, antes da classificação final, verifica-se se esta ocorrência não poderia ser classificada como de uma energização sob falta interna. Para tanto, é observado o valor da energia do primeiro detalhe da TW da forma de onda da corrente do secundário do transformador. A energia é calculada de acordo com a equação 12. Caso o valor desta energia seja zero, o transformador foi energizado sob falta interna. Caso contrário, a situação foi realmente a de uma falta interna. O mesmo raciocínio vale para o caso da classificação inicial como de energização em vazio. Caso a energia do primeiro detalhe da TW da forma de onda da corrente do secundário seja diferente de zero, a ocorrência será classificada como energização sob carga. Em caso contrário, a situação enfrentada realmente é de energização em vazio.

$$Energia = \sum_{n=0}^N x_n^2 \quad (12)$$

Onde n é o número da amostra do detalhe do sinal.

Para finalizar, realiza-se uma análise das saídas do algoritmo e se conclui com relação à condição de operação do transformador de potência, sendo esta indicada pela saída de maior valor das três fases.

Em relação ao trabalho anterior (BRANCO, 2009), este algoritmo apresenta certas modificações, como, por exemplo, a saída da condição de operação do transformador de potência referente à energização em paralelo, pois neste caso não existe nenhum transformador de potência conectado em paralelo ao TR1A, que é o foco deste estudo. Em contraposição, outra condição foi adicionada. Neste caso, a condição de energização sob carga que não foi analisada por (BRANCO, 2009). Além disso, a partir deste trabalho será validada a metodologia do trabalho anterior para uma situação diferente, visto que esta agora será testada para um transformador de potência abaixador. Portanto, para uma completa análise, todas as seis possíveis condições de operação do transformador de potência aqui citadas serão simuladas e os resultados da classificação do algoritmo proposto serão apresentados no Capítulo 6.

A partir das simulações computacionais citadas no Capítulo 4 via *software* ATP, foi verificado o surgimento ou não de correntes diferenciais a cada fenômeno avaliado. Nos casos em que a presença desta corrente era indesejável, sua classificação foi realizada pelo algoritmo modificado desenvolvido por BRANCO (2009), conforme ilustra a Figura 1. Neste sentido, caso a situação geradora da corrente diferencial fosse prejudicial ao transformador protegido, a proteção associada deveria ser sensibilizada.

Caso contrário, ou seja, para os casos de regime, sobre-excitação, energização em vazio, energização sob carga e para os distúrbios de QEE aplicados ao secundário do transfor-

mador, o algoritmo deve ter robustez suficiente para a classificação, justificando o porquê da não atuação da proteção para os casos presenciados.

Para tanto, todos os distúrbios de QEE citados no Capítulo 4 foram também simulados. Lembra-se que na presença destes casos o sistema de proteção associado ao transformador em análise deve interpretar os mesmos como condições de regime permanente.

Ainda com o intuito de avaliar o algoritmo de classificação desenvolvido, algumas das condições de operações do transformador de potência (sobre-excitação, energização sob carga e falta interna) serão simuladas juntamente com distúrbios associados à falta da QEE e aplicados no lado secundário do transformador. Sendo assim, a resposta do algoritmo será verificada em relação à influência que estes eventos podem provocar no sistema primário da concessionária. Este tipo de análise torna-se interessante já que ilustra a maneira com que as distribuidoras de energia sentem os fenômenos ocorridos no lado do consumidor (secundário), a partir dos valores de tensão e corrente esperados, podendo servir como base para aprimoramentos no sistema.

5.4 Caso-exemplo

Nesta seção, será mostrado o passo a passo do algoritmo completo proposto e aplicado a um dos casos simulados, visando melhor ilustrar cada uma das etapas da Figura 42. Para tal demonstração, o caso escolhido refere-se a uma situação de curto-circuito monofásico franco aplicado em L_1 (Figura 28). As formas de onda das correntes trifásicas para esta situação foram tomadas em ambos os lados do transformador por meio dos TC alocados, e são exibidas na Figura 49.

Figura 49 - Correntes trifásicas em ambos os lados do transformador.

Na sequência, verifica-se a ocorrência da saturação dos TC. Pela Figura 49, percebe-se que para algumas amostras, ocorrerá a detecção por parte da primeira RNA deste fenômeno e a necessidade de correção dos sinais. Desta forma, a RNA corretora será acionada. A Figura 50 ilustra as formas de ondas anteriormente apresentadas (Figura 49) já corrigidas pela atuação da segunda RNA.

Figura 50 - Correntes trifásicas em ambos os lados do transformador após a correção da saturação.

Como próximo passo, encontra-se a corrente diferencial (Figura 51) e a corrente de restrição de acordo com as fórmulas mencionadas anteriormente. Posteriormente, processa-se a TWP de quarto nível destas formas de ondas. Sendo assim, as outras duas entradas necessárias e já justificadas ao SF são obtidas e ilustradas na Figura 52.

Figura 51 - Correntes trifásicas diferenciais.

Figura 52 – Outras entradas do Sistema *Fuzzy*.

O SF, que possui a responsabilidade de classificar a condição de operação enfrentada pelo transformador é então acionado. Porém, como o SF é aplicado às três fases do sistema, no final, serão obtidas três respostas. A resposta a ser escolhida dentre as três será a que possui o maior valor de acordo com a variável de saída “Evento”. Neste sentido, para o caso-exemplo, a saída final do algoritmo de proteção e monitoramento é apresentada na Figura 53.

Figura 53 - Saída final do Sistema *Fuzzy* para o caso-exemplo.

Neste caso, por se tratar de um evento externo ao transformador analisado, o algoritmo deveria responder durante toda a simulação acusando uma situação de regime permanente (RE). Contudo, tal resposta não foi evidenciada. A justificativa para tal comportamento vem do surgimento de correntes diferenciais indevidas que vieram a induzir a uma classificação equivocada do algoritmo.

Além disto, em relação aos efeitos refletidos para o lado primário do transformador, nota-se que as tensões sofreram afundamentos com menor intensidade neste lado, quando comparadas às tensões no secundário, e com valores distintos dos esperados pela própria concessionária de energia para esta situação (Figura 56), como será ilustrado no Capítulo 6. Ain-

da para este caso, os percentuais de afundamento, elevação e interrupção das tensões, bem como de aumento e/ou decréscimo das correntes, observados nas três fases do sistema durante o caso-exemplo, são apresentados nas Tabelas 3 e 4.

Figura 54 - Tensões trifásicas em ambos os lados do transformador.

Tabela 3 - Distúrbios observados nas formas de ondas das tensões trifásicas (Figura 54).

	Lado primário	Lado secundário
Fase A	Afundamento de 50%	Interrupção de 95%
Fase B	Afundamento de 10%	Elevação de 20%
Fase C	Regime	Afundamento de 50%

Tabela 4 - Distúrbios referentes às correntes (Figura 49).

	Lado primário	Lado secundário
Fase A	Aumento de 990%	Aumento de 1001%
Fase B	Aumento de 503%	Aumento de 505%
Fase C	Aumento de 415%	Aumento de 419%

6. RESULTADOS DA CLASSIFICAÇÃO DAS OCORRÊNCIAS E DA REFLEXÃO PARA O ALIMENTADOR PRINCIPAL

O propósito deste capítulo é apresentar os resultados do algoritmo proposto frente às várias situações transitórias comumente ocorridas nos transformadores de potência, principalmente, as que originam correntes diferenciais que podem vir a afetar a proteção diferencial convencional. Além disto, serão apresentadas as análises realizadas perante as simulações apontadas anteriormente, na tentativa de relacionar os distúrbios de QEE originários do lado secundário do transformador com as correntes diferenciais que podem vir a surgir, assim como também o efeito destes distúrbios para a concessionária de energia, representada pelo lado primário deste transformador.

Sendo assim, ao longo deste capítulo serão feitas considerações e análises a cerca de todos os casos simulados.

6.1 Algoritmo de proteção e monitoramento

O primeiro caso a ser ilustrado em relação ao algoritmo de proteção e monitoramento diz respeito à condição de regime permanente de operação do sistema. Para tanto, na Figura 55 são mostradas as tensões e correntes trifásicas medidas pelos TPC, TP e TC em ambos os lados do transformador TR1A. Além disto, são exibidas também as entradas do SF: a corrente diferencial, a razão entre a componente de segundo harmônico e a fundamental - I_{h2}/I_{hf} (%), e a razão entre a componente de quinto harmônico e a fundamental - I_{h5}/I_{hf} (%), de cada uma das três fases do sistema. Por fim, a saída do algoritmo referente à classificação da ocorrência também é apresentada. Como pode ser observado, a partir de uma janela de dados de 16 a-

mostras necessárias para a inicialização do processamento, o algoritmo é sensibilizado acusando uma situação de regime permanente (RE) como era esperado.

Em relação à QEE, para esta situação de regime permanente, como era esperado, não se observa nenhuma variação nas magnitudes das formas de onda das tensões e correntes trifásicas em ambos os lados do transformador durante toda a simulação, sendo os valores de DHT e DHI iguais a 0,6% e 0,8%, respectivamente.

No que diz respeito à situação de sobre-excitação (SE), foram realizadas 61 simulações envolvendo os valores de tensão nominal entre 110% e 170%, com passos de acréscimo de 1%. Na prática, um transformador sob uma severa condição de sobre-excitação deve ser desconectado do sistema a fim de evitar maiores danos e percentuais muito acima dos 110% não serão evidenciados. Mesmo assim, para todas as situações, o algoritmo também respondeu como esperado, classificando corretamente todas as situações na maioria de suas amostras já a partir do primeiro caso com 110% do valor de tensão nominal (Figura 56). A correta classificação a partir deste valor representa um avanço em relação à BRANCO (2009) que apenas conseguia classificar adequadamente as situações de sobre-excitação para valores acima de 125% do valor de tensão nominal. Como pode ser observada, a indicação da ocorrência é feita imediatamente após as 16 amostras iniciais necessárias para se completar uma janela de dados. No que se diz respeito à QEE, não se observa uma variação significativa nas magnitudes das formas de onda das tensões e correntes trifásicas em ambos os lados do transformador durante toda a simulação. Já os valores de DHT e DHI para as três fases do lado primário são iguais a 2,5% e 1,2%, respectivamente. Já para o lado secundário o DHT observado foi de 8,6% e o DHI de 4,6%.

Figura 55 - Saída do algoritmo para uma situação de regime permanente.

Figura 56 - Saída do algoritmo para uma situação de sobre-excitação.

Pela observação de como o algoritmo proposto se comportava perante as situações de energização sob carga (EC) e energização em vazio (EV), variou-se o ângulo de inserção destas energizações entre 270° e 90°, em passos de 15°, gerando um total de 13 casos para cada uma. O algoritmo foi capaz de detectar e classificar corretamente todas as situações, como, por exemplo, mostram as Figuras 57 (EC) e 58 (EV).

No caso da EC, os valores de DHT e DHI para cada uma das fases do sistema em ambos os lados do transformador são mostrados nas Tabelas 5 e 6, respectivamente. Entretanto, como no caso da EV o secundário do transformador é mantido em aberto, apenas os valores de DHT e DHI para o lado primário do transformador serão apresentados nas Tabelas 7 e 8, respectivamente.

Tabela 5 - Valores de DHT para a situação de EC.

	Lado primário	Lado secundário
Fase A	10%	12%
Fase B	8%	12%
Fase C	8%	10%

Tabela 6 - Valores de DHI para a situação de EC.

	Lado primário	Lado secundário
Fase A	25%	18%
Fase B	25%	18%
Fase C	20%	18%

Tabela 7 - Valores de DHT para a situação de EV.

	Lado primário
Fase A	15%
Fase B	13%
Fase C	15%

Tabela 8 - Valores de DHI para a situação de EV.

	Lado primário
Fase A	25%
Fase B	23%
Fase C	23%

Para cada situação de falta interna (FI) considerou-se, como apresentado no capítulo 4: o tipo de falta (fase-terra, entre fases ou entre espiras); o enrolamento envolvido (primário ou secundário); a porcentagem deste enrolamento como mostrado na Figura 20; e o ângulo de fase de inserção (entre 270° e 90° , em passos de 15°), gerando um total 364 casos.

Para todos estes casos simulados, o algoritmo apontou corretamente a situação avaliada. Em média, a classificação final teve um atraso de 12 amostras após a real aplicação da falta. Até estas 12 amostras, a ocorrência foi classificada como energização sob carga (EC), devido à presença de componentes harmônicos diferentes da fundamental, como por exemplo, ilustrado na Figura 59.

No que se refere à QEE, se observa uma predominância da frequência fundamental nas formas de onda das tensões e correntes trifásicas em ambos os lados do transformador, mesmo após a aplicação do curto-circuito. Contudo, para cada fase, observam-se diferentes distúrbios e severidades em relação às magnitudes de tensão e corrente como mostram as Tabelas 9 e 10.

Tabela 9 - Distúrbios referentes às tensões.

	Lado primário	Lado secundário
Fase A	Afundamento de 25%	Afundamento de 85%
Fase B	Regime	Elevação de 20%
Fase C	Regime	Afundamento de 15%

Tabela 10 - Distúrbios referentes às correntes.

	Lado primário	Lado secundário
Fase A	Aumento de 490%	Regime
Fase B	Aumento de 305%	Decréscimo de 50%
Fase C	Aumento de 200%	Decréscimo de 45%

Figura 57 - Saída do algoritmo para uma situação de energização sob carga.

Figura 58 - Saída do algoritmo para uma situação de energização em vazio.

Figura 59 - Saída do algoritmo para uma situação de falta interna.

Foram também aplicadas situações de energização sob falta interna (ED). Como para o caso anterior, o número total de casos simulados foi de 364, já que os parâmetros envolvidos são os mesmos.

Como comentado no capítulo 5, para estas situações o SF deveria responder com a indicação de uma falta interna (FI). Porém, após a verificação da energia do detalhe de primeira ordem da TW das correntes do secundário do transformador, nota-se que esta ocorre ao mesmo tempo em que uma energização. Para todos estes casos, o algoritmo indicou corretamente que o transformador estava submetido a uma situação de falta interna durante um procedimento de energização, como por exemplo, exibido na Figura 60. Entretanto, assim como nas situações de falta interna, o tempo de início de detecção ficou comprometido em 12 amostras devido ao conteúdo harmônico caracterizado quando do início de uma falta. Apesar deste atraso, os resultados desta pesquisa também representam um avanço em relação à BRANCO (2009), onde o atraso era, em média, de 16 amostras.

Cabe comentar que, como no caso da ED, o secundário do transformador é mantido em aberto. Sendo assim, apenas os valores de DHT e DHI para o lado primário do transformador serão apresentados nas Tabelas 11 e 12, respectivamente.

Tabela 11 - Valores de DHT.

	Lado primário
Fase A	12%
Fase B	10%
Fase C	10%

Tabela 12 - Valores de DHI.

	Lado primário
Fase A	23%
Fase B	8%
Fase C	12%

Figura 60 - Saída do algoritmo para uma situação de energização sob falta interna.

6.2 Correntes diferenciais originadas por distúrbios de QEE no secundário do transformador

A partir das simulações dos distúrbios de QEE no secundário do transformador TR1A discutidas no Capítulo 4, será verificada a presença ou não de correntes diferenciais sobre o transformador protegido. Frente a tais situações, o que é esperado como classificação por parte do algoritmo de monitoramento é a situação de regime permanente (RE), por tratar-se de eventos externos ao transformador em análise.

Para tal objetivo, curtos-circuitos foram aplicados ao longo do alimentador variando-se o tipo de falta, o local de aplicação e a resistência de falta envolvida, gerando assim, distúrbios de QEE diferentes em cada uma das fases do sistema (afundamentos e elevações de tensão), ou mesmo, envolvendo as três fases (desequilíbrio de tensão).

Inicialmente, para exemplificar estas situações, um curto-circuito monofásico franco e aplicado em L_1 será apresentado. Observando a Figura 61, vê-se que por várias vezes a corrente diferencial torna-se bastante elevada após a aplicação do curto-circuito e, juntamente, com valores elevados de segundo e quinto harmônicos também presentes, acaba afetando o desempenho do algoritmo, que classifica a ocorrência como sobre-excitação (SE) ou energização sob carga (EC).

No que diz respeito à QEE, como dito anteriormente, as tensões e as correntes de cada fase sofrem diferentes distúrbios com diferentes severidades como mostram as Tabelas 13 e 14.

Tabela 13 - Distúrbios referentes às tensões.

	Lado primário	Lado secundário
Fase A	Afundamento de 50%	Interrupção de 95%
Fase B	Afundamento de 10%	Elevação de 20%
Fase C	Regime	Afundamento de 50%

Tabela 14 - Distúrbios referentes às correntes.

	Lado primário	Lado secundário
Fase A	Aumento de 990%	Aumento de 1001%
Fase B	Aumento 503%	Aumento de 505%
Fase C	Aumento de 415%	Aumento de 419%

Ainda para uma falta fase-terra franca, agora aplicada em L_3 , nota-se na Figura 62 uma corrente diferencial com valores menores e componentes de segundo e quinto harmônicos um pouco mais elevados apenas no início da aplicação do curto-circuito, o que também vem prejudicar o funcionamento do algoritmo neste instante. Porém, na sequência, o algoritmo consegue classificar corretamente a ocorrência como RE em relação ao transformador.

Em relação à QEE, os distúrbios observados nas tensões e correntes em cada fase do sistema são quantificados nas Tabelas 15 e 16, respectivamente.

Tabela 15 - Distúrbios referentes às tensões.

	Lado primário	Lado secundário
Fase A	Regime	Afundamento de 10%
Fase B	Regime	Afundamento de 15%
Fase C	Regime	Elevação de 10%

Tabela 16 - Distúrbios referentes às correntes.

	Lado primário	Lado secundário
Fase A	Decréscimo de 20%	Decréscimo de 25%
Fase B	Aumento de 40%	Aumento de 50%
Fase C	Aumento de 35%	Aumento de 41%

Figura 61 - Saída do algoritmo para um curto-circuito fase-terra franco aplicado em L_1 .

Figura 62 - Saída do algoritmo para um curto-circuito fase-terra franco aplicado em L_3 .

Já para a mesma situação de falta fase-terra franca aplicada em L_4 , a corrente diferencial observada na Figura 63 apresenta valores baixos, assim como os harmônicos de segunda e quinta ordem, fazendo com que a situação seja classificada corretamente como RE durante toda a análise.

As Tabelas 17 e 18 ilustram os diferentes distúrbios de QEE ocasionados em cada fase.

Tabela 17 - Distúrbios referentes às tensões.

	Lado primário	Lado secundário
Fase A	Regime	Regime
Fase B	Regime	Regime
Fase C	Regime	Regime

Tabela 18 - Distúrbios referentes às correntes.

	Lado primário	Lado secundário
Fase A	Aumento de 10%	Aumento de 15%
Fase B	Aumento de 10%	Aumento de 15%
Fase C	Decréscimo de 10%	Decréscimo de 15%

Vale frisar que as três situações anteriormente apresentadas e aplicadas em L_1 , L_3 e L_4 foram caracterizadas por uma resistência de falta de zero (0) Ohms. Já para o caso de uma falta fase-terra aplicada com resistência de falta de $40\ \Omega$ em L_1 , a ocorrência apresenta baixos valores de corrente diferencial, segundo e quinto harmônicos, permitindo uma correta análise por parte do algoritmo, como mostrado na Figura 64.

No que diz respeito à QEE, os diferentes distúrbios sofridos por cada fase são exibidos nas Tabelas 19 e 20.

Tabela 19 Distúrbios referentes às tensões.

	Lado primário	Lado secundário
Fase A	Regime	Regime
Fase B	Regime	Regime
Fase C	Regime	Regime

Tabela 20 - Distúrbios referentes às correntes.

	Lado primário	Lado secundário
Fase A	Aumento de 12%	Aumento de 15%
Fase B	Regime	Regime
Fase C	Regime	Regime

Figura 63 - Saída do algoritmo para um curto-circuito fase-terra franco aplicado em L_4 .

Figura 64 - Saída do algoritmo para um curto-circuito fase-terra, com resistência de falta de 40 Ohms, aplicado em L₁.

Seguindo o mesmo procedimento para a situação de uma falta bifásica franca aplicada em L_1 , observa-se também que, devido à proximidade da falta externa com o transformador protegido, para alguns segundos, a corrente diferencial apresenta valores elevados, assim como também, para o conteúdo de segundo harmônico. Tais características fazem com que o algoritmo interprete a situação como sendo uma energização sob carga (EC), como ilustrado na Figura 65.

Em relação à QEE, as Tabelas 20 e 21 mostram os distúrbios ocasionados nas tensões e correntes de cada uma das fases do sistema, respectivamente.

Tabela 21 - Distúrbios referentes às tensões.

	Lado primário	Lado secundário
Fase A	Afundamento de 80%	Afundamento de 50%
Fase B	Afundamento de 10%	Regime
Fase C	Afundamento de 10%	Afundamento de 50%

Tabela 22 - Distúrbios referentes às correntes.

	Lado primário	Lado secundário
Fase A	Aumento de 980%	Aumento de 990%
Fase B	Regime	Regime
Fase C	Aumento de 985%	Aumento de 995%

A mesma falta bifásica franca agora a em L_3 , apresenta corrente diferencial elevada apenas em uma fase inicial, assim como também os conteúdos de segundo e quinto harmônico, afetando inicialmente a decisão do algoritmo que classifica a ocorrência como energização sob carga (EC). Porém, na sequência, o algoritmo vem a classificar corretamente a situação como sendo regime permanente (RE), como mostra a Figura 66.

A análise referente aos distúrbios de QEE observados em cada fase do sistema é retratada pelas Tabelas 23 e 24.

Tabela 23 - Distúrbios referentes às tensões.

	Lado primário	Lado secundário
Fase A	Regime	Regime
Fase B	Afundamento de 10%	Afundamento de 20%
Fase C	Afundamento de 15%	Afundamento de 15%

Tabela 24 - Distúrbios referentes às correntes.

	Lado primário	Lado secundário
Fase A	Regime	Regime
Fase B	Aumento de 315%	Aumento de 320%
Fase C	Aumento de 480%	Aumento de 390%

Como no caso da falta fase-terra, para um curto-circuito aplicado em L_4 , já não há mais interferência da aplicação de uma falta bifásica franca no surgimento de correntes diferenciais, ou aumento dos níveis de conteúdo de segundo e quinto harmônico presentes. Ou seja, o algoritmo classifica desde o início da análise a ocorrência como sendo regime permanente (RE) – Figura 67.

As Tabelas 25 e 26 ilustram os distúrbios de QEE observados em ambos os lados do transformador em relação às tensões e correntes trifásicas.

Tabela 25 - Distúrbios referentes às tensões.

	Lado primário	Lado secundário
Fase A	Regime	Regime
Fase B	Regime	Regime
Fase C	Regime	Regime

Tabela 26 - Distúrbios referentes às correntes.

	Lado primário	Lado secundário
Fase A	Aumento de 95%	Aumento de 98%
Fase B	Regime	Regime
Fase C	Aumento de 70%	Aumento de 75%

Figura 65 - Saída do algoritmo para um curto-circuito fase-fase franco aplicado em L_1 .

Figura 66 - Saída do algoritmo para um curto-circuito fase-fase franco aplicado em L_3 .

Figura 67 - Saída do algoritmo para um curto-circuito fase-fase franco aplicado em L₄.

Para situações de faltas com resistências mais elevadas ($40\ \Omega$), a falta bifásica em L_1 , já não apresenta nenhuma interferência na decisão do algoritmo. Como pode ser observada pela Figura 68, a classificação da ocorrência é realizada com sucesso desde seu início.

No que diz respeito à QEE, cada fase sofre diferentes distúrbios com diferentes severidades como apontam as Tabelas 27 e 28.

Tabela 27 - Distúrbios referentes às tensões.

	Lado primário	Lado secundário
Fase A	Regime	Regime
Fase B	Regime	Regime
Fase C	Regime	Regime

Tabela 28 - Distúrbios referentes às correntes.

	Lado primário	Lado secundário
Fase A	Aumento de 150%	Aumento de 155%
Fase B	Regime	Regime
Fase C	Aumento de 135%	Aumento de 137%

Os mesmos resultados e análises podem ser extrapolados para as situações de falta bifásica-terra (Figuras 69 a 72) e trifásica (Figuras 73 a 76). Ou seja, para as situações de curto-circuito mais próximas ao transformador, o algoritmo será afetado pela presença de altas correntes diferenciais e elevados conteúdos de segundo e quinto harmônico. Ao se afastar do transformador, essa influência irá diminuindo, a ponto de só ter efeito no início da aplicação da falta. Já para distâncias maiores com relação ao transformador protegido (loais L_4 e L_5), nenhuma interferência é observada e o algoritmo aponta corretamente a situação evidenciada desde o início da análise. O mesmo vale para situações de curtos-circuitos aplicados com resistência de falta de $40\ \Omega$. Para estas situações, nenhum dos casos apresentou efeito negativo na decisão do algoritmo proposto.

Figura 68 - Saída do algoritmo para um curto-circuito fase-fase, com resistência de falta de 40 Ohms, aplicado em L_1 .

Figura 69 - Saída do algoritmo para um curto-circuito fase-fase-terra franco aplicado em L_1 .

Figura 70 - Saída do algoritmo para um curto-circuito fase-fase-terra franco aplicado em L_3 .

Figura 71 - Saída do algoritmo para um curto-circuito fase-fase-terra franco aplicado em L₄.

Figura 72 - Saída do algoritmo para um curto-circuito fase-fase-terra, com resistência de falta de 40 Ohms, aplicado em L_1 .

Figura 73 - Saída do algoritmo para um curto-circuito trifásico franco aplicado em L_1 .

Figura 74 - Saída do algoritmo para um curto-circuito trifásico franco aplicado em L_3 .

Figura 75 - Saída do algoritmo para um curto-circuito trifásico franco aplicado em L₄.

Figura 76 - Saída do algoritmo para um curto-circuito trifásico com resistência de falta de 40 Ohms aplicado em L_1 .

Referente às cargas não lineares, retificador (Figura 77) e FEA (Figura 78), em L_1 , como já esperado, a inserção das mesmas não irá fazer surgir uma corrente diferencial considerável para o transformador protegido, assim como também não altera os níveis do conteúdo de segundo e quinto harmônicos. Desta maneira, o algoritmo irá classificar a ocorrência de maneira como sendo regime permanente durante toda a análise.

No que se refere à QEE, para os dois tipos de cargas não lineares, não se observaram uma variação significativa nas magnitudes das formas de onda das tensões e correntes trifásicas em ambos os lados do transformador durante toda a simulação. O mesmo ocorreu para os valores de DHT e DHI, que para as três fases foram iguais a 0,6% e 0,8%, respectivamente, para ambos os lados do transformador.

Figura 77 - Saída do algoritmo com a inserção do retificador em L_1 .

Figura 78 - Saída do algoritmo com a inserção do FEA em L_1 .

6.3 Efeitos refletidos para o lado primário devido aos distúrbios de QEE aplicados no lado secundário do transformador

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos quando das simulações de distúrbios de QEE no lado secundário do transformador TR1A e da propagação (reflexão) destes para o lado primário do transformador. Desta maneira, procurar-se-á analisar o que a concessionária de energia percebe quando da ocorrência de algum evento de QEE em seus consumidores de energia finais.

Para esta análise, todos os casos de afundamentos e elevações de tensão gerados a partir dos curtos-circuitos serão utilizados, como na seção anterior. Porém, assim como foi observado anteriormente, para os casos com resistência de falta de $40\ \Omega$, as formas de onda das tensões e correntes trifásicas em ambos os lados do transformador, praticamente, não sofrem alterações. Desta maneira, atenção será dada apenas aos casos de distúrbios de QEE originados a partir de curtos-circuitos francos nos cinco pontos considerados.

Para exemplificar esta propagação ocorrida no lado primário, pelos distúrbios de QEE simulados no lado secundário do transformador TR1A, na Figura 79 estão representadas as formas de onda das tensões e correntes trifásicas observadas para um curto-circuito trifásico franco aplicado em L_1 .

AUNG e MILANOVIC (2006) apresentam um estudo de como as tensões trifásicas devem se comportar em ambos os lados de um transformador a depender do tipo de ligação presente entre o primário e secundário. Como, o transformador TR1A em análise nesta pesquisa possui ligação delta-estrela (Dyn1), o trabalho de AUNG e MILANOVIC (2006) será utilizado como referência para se calcular os valores esperados no primário a partir dos distúrbios de QEE provocados no seu lado secundário.

Figura 79 - Formas de onda das tensões e correntes trifásicas em ambos os lados do transformador observadas para um curto-circuito trifásico franco aplicado em L_1 .

Pelos resultados apresentados, fica claro que dependendo do tipo de falta ocorrido em um dos lados do transformador, para o outro lado, podem ser refletidas situações de afundamento em uma, ou duas fases, ou até mesmo de interrupção em uma das fases, como mostra a Tabela 29. Por exemplo, para uma falta fase-terra, os valores dos afundamentos refletidos para o outro lado do transformador são no máximo de 0,58 pu. da tensão eficaz de pré-falta para duas das fases (incluindo a fase faltosa), mantendo-se a terceira fase sã.

Tabela 29 - Propagação de um afundamento de tensão causado por faltas assimétricas através de um transformador Dyn1.

Tipo de falta	Tensões de falta (pu.)	Afundamento de tensão propagado (pu.)
Fase-terra	0	0,58
	1	0,58
	1	1
Fase-fase-terra	0	0,58
	0	0
	1	0,58
Fase-fase	1	0,87
	0,5	0,87
	0,5	0

Por meio de simulações em regime permanente sobre o sistema elétrico em análise, observa-se que o erro decorrente do uso da formulação proposta por AUNG e MILANOVIC (2006) é de no máximo 1% para os valores de tensão e de 5% para os valores de corrente. Logo, estes valores serão adotados como limiares para a análise dos efeitos ocasionados no primário do transformador, tomando como base os valores de tensão e corrente esperados.

A seguir serão apresentadas algumas tabelas compostas das seguintes colunas: local de aplicação do curto-circuito (Local); tensão eficaz média medida na fase “n” (V_{nm}) (V); tensão eficaz média esperada na fase “n” (V_{ne}) (V); erro relativo da tensão da fase “n” (e_{Vn}) (%); cor-

rente eficaz média medida na fase “n” (I_{nm}) (A); corrente eficaz média esperada na fase “n” (I_{ne}) (A); e erro relativo da corrente da fase “n” (e_{ln}) (%).

As Tabelas de 30 a 33 representam, respectivamente, os curtos-circuitos francos do tipo fase-terra, fase-fase, fase-fase-terra e trifásica. As células em destaque apontam os casos em que os limiares anteriormente apontados foram ultrapassados.

Observa-se pelas tabelas apresentadas que na medida em que a distância em relação ao transformador TR1A vai aumentando, os erros relativos apresentados, tanto pelas tensões, quanto pelas correntes, vão diminuindo.

Vale ainda destacar o caso de curtos-circuitos trifásicos (Tabela 4), em que os erros relativos apresentados são altos para as situações de faltas aplicadas próximas ao transformador TR1A.

No que segue, atenção será dada aos efeitos ocasionados pela conexão das cargas não lineares ao sistema.

Como já apresentado, a conexão do retificador não chega a surtir efeito considerável nas formas de onda das tensões e correntes em ambos os lados do transformador TR1A.

Porém, como pode ser observado na Figura 80, o transformador próprio do retificador apresenta um conteúdo harmônico considerável com componentes ímpares não múltiplos de três. No entanto, este conteúdo harmônico não se propaga para o lado primário do próprio transformador como mostrado em Figura 81.

Tabela 30 - Curtos-circuitos francos fase-terra.

Local	V _{am}	V _{ae}	e _{Va} (%)	V _{bm}	V _{be}	e _{Vb} (%)	V _{cm}	V _{ce}	e _{Vc} (%)	I _{am}	I _{ae}	eI _a (%)	I _{bm}	I _{be}	eI _b (%)	I _{cm}	I _{ce}	eI _c (%)
L ₁	73,7	77,4	4,8	131,9	131,7	0,1	111,1	113,5	2,1	19,1	21,9	12,7	8,0	9,4	14,6	11,1	12,5	11,2
L ₂	131,7	126,1	4,4	122,6	131,7	6,9	120,8	111,3	8,5	1,2	1,3	6,3	3,8	4,1	7,1	4,4	4,9	10,9
L ₃	131,7	126,1	4,4	120,8	131,7	8,2	122,6	111,3	10,2	1,2	1,3	6,3	3,8	4,1	7,1	4,4	4,9	10,9
L ₄	126,0	125,8	0,1	131,9	131,7	0,1	127,4	129,1	1,6	3,0	3,2	7,3	1,4	1,4	4,2	3,0	3,1	4,7
L ₅	128,1	128,1	0,0	131,9	131,7	0,1	129,6	130,2	0,5	2,6	2,8	4,6	1,7	1,8	2,4	2,6	2,7	3,3

Tabela 31 - Curtos-circuitos francos fase-fase.

Local	V _{am}	V _{ae}	e _{Va} (%)	V _{bm}	V _{be}	e _{Vb} (%)	V _{cm}	V _{ce}	e _{Vc} (%)	I _{am}	I _{ae}	eI _a (%)	I _{bm}	I _{be}	eI _b (%)	I _{cm}	I _{ce}	eI _c (%)
L ₁	40,5	74,3	45,4	116,7	123,2	5,2	115,2	131,7	12,5	23,0	26,4	12,9	21,0	24,4	14,0	2,06	2,05	0,1
L ₂	126,4	131,7	4,1	95,1	127,7	25,5	120,9	126,3	4,2	2,0	2,0	0,1	10,1	11,5	11,9	8,1	9,5	14,3
L ₃	126,3	131,7	4,1	95,1	127,7	25,5	120,9	126,3	4,2	2,0	2,0	0,1	10,1	11,4	11,9	8,1	9,5	14,3
L ₄	115,2	121,9	5,5	124,1	128,7	3,5	131,5	131,7	0,2	6,2	6,9	9,9	4,6	5,3	11,9	2,0	2,0	0,1
L ₅	124,0	128,3	3,3	127,1	130,1	2,3	132,8	131,7	0,8	4,3	4,7	7,8	3,3	3,6	8,5	2,0	2,0	0,3

Tabela 32 - Curtos-circuitos francos fase-fase-terra.

Local	V _{am}	V _{ae}	e _{Va} (%)	V _{bm}	V _{be}	e _{Vb} (%)	V _{cm}	V _{ce}	e _{Vc} (%)	I _{am}	I _{ae}	eI _a (%)	I _{bm}	I _{be}	eI _b (%)	I _{cm}	I _{ce}	eI _c (%)
L ₁	107,8	147,2	26,8	107,8	147,2	26,8	98,4	98,9	0,6	26,2	30,0	12,6	18,1	21,0	13,5	9,6	13,0	25,7
L ₂	95,1	109,4	13,1	95,1	109,4	13,1	117,4	100,1	17,3	2,5	2,6	4,6	10,0	11,4	12,1	8,3	9,7	14,0
L ₃	95,1	109,4	13,1	95,1	109,4	13,1	117,4	100,1	17,2	2,5	2,6	4,6	10,0	11,4	12,0	8,3	9,7	14,0
L ₄	122,4	131,3	6,8	122,4	131,3	6,8	129,5	126,8	2,1	6,0	6,7	9,8	4,9	5,5	11,9	2,2	2,2	1,8
L ₅	126,2	131,5	4,0	126,2	131,5	4,0	131,5	129,8	1,3	4,2	4,6	7,8	3,5	3,8	8,4	2,1	2,2	1,1

Tabela 33 - Curtos-circuitos francos trifásicos.

Local	V _{am}	V _{ae}	e _{Va} (%)	V _{bm}	V _{be}	e _{Vb} (%)	V _{cm}	V _{ce}	e _{Vc} (%)	I _{am}	I _{ae}	eI _a (%)	I _{bm}	I _{be}	eI _b (%)	I _{cm}	I _{ce}	eI _c (%)
L ₁	40,5	2,1	1.805,9	40,6	2,1	1.806,6	40,5	2,2	1.723,6	30,3	35,0	13,5	29,0	26,1	11,0	34,8	28,4	22,8
L ₂	95,2	80,1	18,8	95,1	80,0	18,9	95,2	80,1	18,8	10,5	12,1	13,0	10,5	12,1	12,9	10,5	12,1	13,1
L ₃	95,2	80,1	18,8	95,1	80,0	18,9	95,2	80,1	18,8	10,5	12,1	12,9	10,5	12,1	12,8	10,5	12,1	13,1
L ₄	115,1	108,4	6,3	115,1	108,2	6,3	115,0	108,2	6,2	6,2	7,0	11,0	6,2	7,0	11,0	6,2	7,0	11,3
L ₅	124,0	120,7	2,8	123,8	120,7	2,6	124,0	120,8	2,6	4,3	4,7	8,7	4,3	4,7	8,6	4,3	4,7	8,6

Figura 80 - Espectro de frequência da tensão no secundário do transformador do retificador.

Figura 81 - Espectro de frequência da tensão no primário do transformador do retificador.

Já em relação às correntes trifásicas, como visto anteriormente no espectro de frequência (Figuras 35 e 36) e agora nas formas de onda do primário e secundário (Figuras 82 e 83), observa-se que nenhuma componente harmônica é filtrada pelo transformador. Ou seja, os

conteúdos harmônicos propagam-se até em mesma quantidade para o primário do transformador.

Figura 82 - Correntes trifásicas observadas no primário do transformador de conexão do retificador.

Figura 83 - Correntes trifásicas observadas no secundário do transformador de conexão do retificador.

Sobre a conexão do FEA, esta também não chega a surtir efeito considerável nas formas de onda das tensões e correntes em ambos os lados do transformador TR1A. Contudo, direcionando a análise para o transformador próprio do FEA, como pode ser ilustrado pela Figura 84, observa-se um conteúdo harmônico na tensão com componentes de ordem bastante elevada, bem como um conteúdo sub-harmônico. Porém, este conteúdo harmônico também não se propaga para o lado primário do próprio transformador como mostrado em Figura 85.

Figura 84 - Espectro de frequência da tensão no secundário do transformador do FEA.

Já em relação às correntes trifásicas, como visto anteriormente no espectro de frequência (Figuras 40 e 41) e agora nas formas de onda do primário e secundário (Figuras 86 e 87), observa-se que nenhuma componente harmônica é filtrada pelo transformador, ou seja, os conteúdos harmônicos propagam-se até em mesma quantidade, destacando também a presença de componentes sub-harmônicas.

Figura 85 - Espectro de frequência da tensão no primário do transformador do FEA.

Figura 86 - Correntes trifásicas observadas no primário do transformador de conexão do FEA.

Figura 87 - Correntes trifásicas observadas no primário do transformador de conexão do FEA.

6.4 Avaliação do algoritmo de monitoramento frente à aplicação de distúrbios de QEE no lado secundário do transformador

Nesta seção, para uma validação ainda mais completa do algoritmo proposto, certas condições de operação serão consideradas simultaneamente à aplicação de distúrbios associados à falta de QEE no lado secundário do transformador.

As situações de energização em vazio e energização sob falta interna serão descartadas desta análise, já que para estas o secundário do transformador permanece em aberto.

Todas as outras condições de operação: sobre-excitação; energização sob carga e falta interna serão analisadas juntamente com os distúrbios associados à falta de QEE ocorrendo simultaneamente no lado secundário do transformador em análise.

Vários tipos de combinações foram simulados. Porém, apenas alguns casos mais ilustrativos serão apresentados. Isto se deve ao fato de que, por exemplo, não foram observadas diferenças na resposta do algoritmo quando da aplicação dos diferentes tipos de falta (fase-

terra, bifásica, bifásica-terra ou trifásica). Assim, para efeito de ilustração, será apenas apresentado o tipo fase-terra. Como já apresentado, as situações caracterizadas por resistência de falta de $40 \, \Omega$ não apresentam interferência na decisão do algoritmo. Deste modo, todos os casos aqui apresentados serão curtos-circuitos francos (sólidos). Logo, apenas o local de aplicação da falta será variado até que o algoritmo não acuse mais influência do curto-circuito aplicado.

Inicialmente, será considerada uma situação de sobre-excitação do transformador de 170%, com um curto-circuito fase-terra franco aplicado em L_1 , gerando um desequilíbrio de tensão nas fases do sistema, o que faz com que o algoritmo forneça uma saída correta (SE) até o instante de aplicação do curto-circuito em 0,1 s. Na sequência, a situação é classificada como energização sob carga (EC), devido aos elevados conteúdos de segundo e quinto harmônicos no início da falta. No que segue a classificação volta a ser a correta (SE), como mostra a Figura 88.

Em relação à QEE, os valores de DHT e DHI para cada uma das fases do sistema, em ambos os lados do transformador são apresentados nas Tabelas 34 e 35, respectivamente.

Tabela 34 - Valores de DHT

	Lado primário	Lado secundário
Fase A	3%	2%
Fase B	2%	2%
Fase C	3%	2%

Tabela 35 - Valores de DHI.

	Lado primário	Lado secundário
Fase A	4%	10%
Fase B	3%	12%
Fase C	3%	12%

Figura 88 - Saída do algoritmo para uma situação de sobre-excitação do transformador com um curto-circuito fase-terra franco aplicado em L_1 .

O mesmo comportamento se repete ao longo da aplicação dos curtos-circuitos em L_2 e L_3 , até chegarmos à situação onde este curto-circuito fase-terra franco é aplicado em L_4 . A partir deste ponto, a corrente diferencial apresenta valores menores, assim como o conteúdo de segundo harmônico não é tão elevado de modo que venha a afetar a classificação da ocorrência como sobre-excitação (SE), como ilustrado na Figura 89.

Os valores de DHT e DHI para cada uma das fases do sistema, em ambos os lados do transformador, são apresentados nas Tabelas 36 e 37, respectivamente.

Tabela 36 - Valores de DHT.

	Lado primário	Lado secundário
Fase A	2%	3%
Fase B	2%	3%
Fase C	2%	3%

Tabela 37 - Valores de DHI.

	Lado primário	Lado secundário
Fase A	6%	8%
Fase B	6%	8%
Fase C	6%	8%

Figura 89 - Saída do algoritmo para uma situação de sobre-excitação do transformador com um curto-circuito fase-terra franco aplicado em L_4 .

Para os casos de energização sob carga (EC), aplicando a falta fase-terra franca em L_1 (no instante de 0,13 s), nota-se que o algoritmo não responde como esperado em apenas uma das amostras, classificando-a como falta interna (FI) – Figura 90.

As Tabelas 38 e 39 mostram os valores de DHT e DHI para cada uma das fases do sistema em ambos os lados do transformador.

Tabela 38 - Valores de DHT.

	Lado primário	Lado secundário
Fase A	8%	2%
Fase B	9%	9%
Fase C	7%	8%

Tabela 39 - Valores de DHI.

	Lado primário	Lado secundário
Fase A	2%	12%
Fase B	7%	15%
Fase C	6%	13%

Já no próximo ponto de aplicação do curto-circuito (em L_2), mantendo o mesmo caso de curto-circuito fase-terra franco, o algoritmo vem a classificar corretamente todas as amostras como energização sob carga (EC), como ilustrado pela Figura 91.

As Tabelas 40 e 41 mostram os valores de DHT e DHI para cada uma das fases do sistema em ambos os lados do transformador.

Tabela 40 - Valores de DHT.

	Lado primário	Lado secundário
Fase A	12%	17%
Fase B	15%	17%
Fase C	13%	16%

Tabela 41 - Valores de DHI.

	Lado primário	Lado secundário
Fase A	22%	24%
Fase B	23%	12%
Fase C	20%	14%

Por fim, têm-se os casos de falta interna (FI). Para ilustrar tais situações, utiliza-se de uma falta interna fase-terra aplicada no primário envolvendo 80% do enrolamento, no instante 0,1 s. Frente a esta situação, o algoritmo responde inicialmente como sendo de energização, devido aos valores elevados de segundo e quinto harmônico no início da falta. Contudo, após 12 amostras, o algoritmo classifica corretamente a situação. Posteriormente, no instante de 0,15 s, um novo curto-circuito fase-terra franco é aplicado em L_1 . A partir deste instante, a resposta do algoritmo é dada erroneamente como sendo de energização sob carga (EC), como ilustrado na Figura 92.

As Tabelas 42 e 43 mostram os valores dos distúrbios de QEE para cada uma das fases do sistema em ambos os lados do transformador.

Tabela 42 - Valores de DHT.

	Lado primário	Lado secundário
Fase A	2%	2%
Fase B	3%	4%
Fase C	2%	3%

Tabela 43 - Valores de DHI.

	Lado primário	Lado secundário
Fase A	2%	15%
Fase B	2%	18%
Fase C	2%	18%

Figura 90 - Saída do algoritmo para uma situação de energização sob carga do transformador com um curto-circuito fase-terra franco aplicado em L_1 .

Figura 91 - Saída do algoritmo para uma situação de energização sob carga do transformador com um curto-circuito fase-terra franco aplicado em L₂.

Figura 92 - Saída do algoritmo para uma situação de falta interna do transformador com um curto-circuito fase-terra franco aplicado em L_1 .

Ao longo do alimentador, esta situação se repete, até que este curto-circuito fase-terra franco é aplicado em L₄. A partir deste ponto, já não há mais influência por parte do curto-circuito na decisão do algoritmo, que vem a classificar, após 12 amostras, a situação enfrentada como de falta interna (FI) (Figura 93).

As Tabelas 44 e 45 mostram os valores dos distúrbios de QEE para cada uma das fases do sistema em ambos os lados do transformador.

Tabela 44 - Valores de DHT.

	Lado primário	Lado secundário
Fase A	2%	3%
Fase B	2%	3%
Fase C	2%	3%

Tabela 45 - Valores de DHI.

	Lado primário	Lado secundário
Fase A	4%	8%
Fase B	3%	12%
Fase C	3%	9%

Figura 93 - Saída do algoritmo para uma situação de falta interna do transformador com um curto-circuito fase-terra franco aplicado em L_4 .

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo inicial um aprimoramento do algoritmo de monitoramento para transformadores desenvolvido por BRANCO (2009). Um estudo mais aprofundado das usuais condições de operação do transformador foi realizado diante aos distintos fenômenos relacionados à proteção de transformadores. Na sequência, a influência de diferentes eventos originados sobre o sistema pelos consumidores para a operação dos transformadores e seus respectivos desdobramentos também foi motivo de investigação.

Para tanto, foi utilizado o *software* ATP para melhor caracterizar e gerar todas as condições operacionais desejadas. Como o sistema elétrico utilizado foi composto por elementos de geração, transmissão e distribuição, foi também necessário um estudo detalhado de cada porção do sistema para analisar coerentemente os resultados obtidos via as simulações computacionais realizadas.

Cabe comentar também, ainda em relação às simulações que, como um número elevado de casos foi necessário para certas análises, programas de simulação automática foram criados em linguagem C++, tornando mais rápido o processo de manipulação dos dados desejados.

Sobre a detecção e correção da saturação do TC, esta se realizou de forma bastante satisfatória, visto que as funções implementadas apresentaram rapidez na detecção e precisão na compensação. Conforme evidenciado nos resultados apresentados, tais funcionalidades proporcionaram maior confiabilidade ao algoritmo desenvolvido.

O SF considerado nesta pesquisa, também foi aprimorado em relação ao trabalho de BRANCO (2009), pois a situação de energização sob carga foi acrescida. Além disto, para a situação de sobre-excitação, o algoritmo de proteção e monitoramento agora aprimorado classificou corretamente todas as situações (61 casos) na maioria de suas amostras, já a partir do

primeiro caso com 110% de sobre-excitação. A correta classificação a partir deste valor representa um avanço em relação à BRANCO (2009) que apenas conseguia classificar adequadamente as situações de sobre-excitação para valores acima de 125% do valor de tensão nominal. Outro avanço que pode ser destacado em relação à BRANCO (2009), diz respeito a classificação das situações de falta interna e de energização sob falta interna, que para todos os 728 casos, foi realizada com um tempo médio de atraso de 12 amostras. Já no trabalho anterior, o atraso era, em média, de 16 amostras.

A partir das simulações de curtos-circuitos externos ao transformador, gerando distúrbios de QEE em seu lado secundário, notou-se que dependendo do local da aplicação dos mesmos, correntes diferenciais podem vir a surgir fazendo com que o algoritmo proposto venha a classificar (diagnosticar) erroneamente a condição de operação enfrentada pelo transformador. Desta forma, para situações de curto-circuito mais próximas ao transformador (local L_1), o algoritmo será afetado pela presença de altas correntes diferenciais e elevados conteúdos de segundo e quinto harmônico. Ao se afastar do transformador (locais L_2 e L_3), essa influência irá diminuindo, a ponto de só ter efeito no início da aplicação da falta. Já para distâncias maiores que 10 km com relação ao transformador protegido (locais L_4 e L_5), nenhuma interferência é observada, e o algoritmo apontará corretamente a situação evidenciada desde o início da análise. Ou seja, dos 20 casos simulados, em 8 destes, o algoritmo aponta a classificação como regime permanente desde o início da simulação. O mesmo vale para situações de curtos-circuitos aplicados com resistência de falta de 40Ω . Para estas situações, nenhum dos 20 casos apresentou efeito negativo na decisão do algoritmo proposto. Em relação às cargas não lineares, já em L_1 , a inserção das mesmas não irá fazer surgir uma corrente diferencial considerável para o transformador protegido, assim como também não altera os níveis do conteúdo de segundo e quinto harmônicos. Desta maneira, o algoritmo irá classificar a ocorrência de maneira como sendo regime permanente durante toda a análise.

Outra observação importante vem da análise realizada em relação à propagação dos distúrbios de QEE aplicados no lado secundário do transformador. Como visto, em várias situações (98 das 120 grandezas observadas durante as simulações), os valores das tensões e correntes tornam-se distantes dos valores esperados pelas concessionárias de energia no lado primário do transformador. Desta maneira, na medida em que a distância em relação ao transformador TR1A aumenta, os erros relativos apresentados, tanto pelas tensões, quanto pelas correntes, vão diminuindo. Outro ponto importante a destacar é que no caso de curtos-circuitos trifásicos, os erros relativos apresentados são bastante elevados para situações de faltas aplicadas próximas ao transformador TR1A. Como já dito, a conexão das cargas não lineares não chega a surtir efeito considerável nas formas de onda das tensões e correntes em ambos os lados do transformador TR1A.

Por fim, quando o algoritmo proposto foi colocado frente às condições de operação do transformador, juntamente com distúrbios de QEE no seu lado secundário, este se mostrou robusto. Porém, para distâncias muito próximas ao transformador protegido, um conteúdo harmônico complexo confundiu a tomada de decisão por parte do algoritmo implementado. Para 40% dos 305 casos simulados de sobre-excitação, e 1820 de falta interna, o algoritmo respondeu corretamente desde o início da simulação. Já para os 65 casos de energização sob carga, o algoritmo respondeu corretamente durante toda a simulação em 80% dos casos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADDISON, P. S. **The Illustrated Wavelet Transform Handbook: Introductory Theory and Applications in Science, Engineering, Medicine and Finance.** Institute of Physics Publishing, 2002.

ADILÉA, W. **Extração de Conhecimento a partir de Redes Neurais aplicada ao Problema da Cinemática Inversa na Robótica.** Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, 2003.

ANEEL. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema - Módulo 8: Qualidade da Energia Elétrica.**, 2009.

ARAÚJO, C. A. S. et al. **Proteção de Sistemas Elétricos.** 2^a. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2005.

AUNG, M. T.; MILANOVIC, J. V. The Influence of Transformer Winding Connections on the Propagation of Voltage Sags. **Power Delivery, IEEE Transactions on** , v. 21, n.1, p. 262 - 269 , January 2006.

BARBOSA, D. **Sistema híbrido inteligente para o monitoramento e proteção de transformadores de potência.** Tese de Doutorado. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2010.

BARROS, J.; DIEGO, R. Application of the wavelet-packet transform to the estimation of harmonic groups in current and voltage waveforms. **Power Delivery, IEEE Transactions**, 2006. 533-535.

BERNARDES, A. P. **Esquema completo de proteção diferencial de transformadores para testes de um relé digital.** Dissertação de Mestrado. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2006.

BRANCO, H. M. G. C. **Uma estratégia para a detecção e classificação de transitórios em transformadores de potência pela utilização da Transformada Wavelet e da Lógica Fuzzy.** Dissertação de Mestrado. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2009.

BRONZEADO, H.; YACAMINI, R. Phenomenon of sympathetic interaction between transformers caused by inrush transients. **IEE Proceedings on Science, Measurement and Technology**, v. 142, n. 4, July 1995. 323-329.

CANGUÇU, N. A. **Contribuições para avaliação dos impactos econômicos causados por mergulho de tensão em sistema elétrico industrial.** Ilha Solteira-SP: Dissertação de Mestrado, 2006.

CHUI, C. **Wavelet Analysis and its applications**: A tutorial in theory and applications. San Diego: Academic Press, v. 2, 1992.

COURY, D. V.; OLESKOVICZ, M.; GIOVANINI, R. **Proteção digital de sistemas elétricos de potência**: Dos relés eletromecânicos aos microprocessados inteligentes. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, 2007.

DASHTI, H.; PASAND, M. S.; DAVARPANAH, M. Fast and Reliable CT Saturation Detection Using a Combined Method. **Power Delivery, IEEE Transactions on** , vol.24, no.3, July 2009. 1037-1044.

DEBNATH, L. **Wavelet transform & their applications**. Boston : Birkhauser, 2002.

DEITEL, H. M.; DEITEL, P. J. **C++ como programar, 3 ed.** Porto Alegre: Bookman, 2001.

DILLON, T. S.; NIEBUR, D. **Neural Network Applications in Power Systems**. London: CRL Publishing Ltd, 1996.

DUGAN, R. C.; MCGRANAGHAN, M. C.; WAYNE BEATY, H. **Electrical Power Systems Quality**. McGraw-Hill, 2002.

EL- NAGGAR, K. M.; YOUSSEF, H. A genetic based algorithm for frequency-relaying applications. **Electric Power Systems Research**, vol. 55, p. 173–178, 2000.

ERISTI, H.; DEMIR, Y. A new algorithm for automatic classification of power quality events based on wavelet transform and SVM. **Expert Systems with Applications, Volume 37, Issue 6**, June 2010. 4094-4102, ISSN 0957-4174, DOI: 10.1016/j.eswa.2009.

FFL. Free Fuzzy Logic Library, 2002. Disponível em: <<http://ffll.sourceforge.net/>>. Acesso em: 2011.

FORRESTER, J. **Industrial Dynamics**. Portland, Oregon, EUA: Productivity Press, 1961.

GARCIA, M. A. **A modelagem de cargas especiais (não-lineares) para estudos relacionados à qualidade da energia elétrica via software ATP**. Trabalho de Conclusão de Curso. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2010.

GAVIRA, M. D. O. **Simulação computacional como uma ferramenta de aquisição de conhecimento**. Departamento de Engenharia de Produção, Escola de Engenharia de São Carlos: 2003.

GIBELLI, G. B. **Resposta dinâmica dos motores de indução trifásicos a afundamentos de tensão na rede de alimentação**. Dissertação de Mestrado. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2009.

GOLDBERGE, D. **Genetic algorithms in search, Optimization and Machine Learning**. Addison-Wesely, 1989.

GU, J.; ZHENG, T.; HUANG, S. The influence and countermeasure to transformer differential protection of CT saturation caused by external fault removal. **Electrical Machines and Systems**, 17-20 Oct 2008. 4497-4502.

GUERRA, F. C. F.; ARAÚJO, L. L.; MEDEIROS, L. D. C. Correção Numérica de Correntes Secundárias Distorcidas em Transformadores de Corrente. **VIII Conferência Brasileira de Qualidade da Energia Elétrica**, 2009.

GUIDO, R. C.; PEREIRA, J. C.; SLAETS, J. F. W. Introduction to the special issue on Wavelet-based algorithms and emergent classification techniques in science and Engineering. **Journal of Computational and Applied Mathematics, Elsevier**, v. 227 , n. 2, 2009.

HARLOW, J. H. **Electric Power Transformer Engineering**. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2007.

HAYKIN, S. **Redes neurais: princípios e prática**. Porto Alegre: Bookman, 2001.

HONG, Y.-Y.; WEI, D.-W. Compensation of Distorted Secondary Current Caused by Saturation and Remanence in a Current Transformer. **Power Delivery, IEEE Transactions on** , vol.25, no.1, Jan. 2010. 47-54.

HOROWITZ, S. H.; PHADKE, A. G. **Power System Relaying**, 2 ed. New York: John Wiley & Sons Inc, 1995.

HORTON, R. A time-domain ac electric arc furnace model for flicker planning studies. **IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY** 24, 2009. 1450-1457.

IEC. **Programmable controllers - part 7: Fuzzy control programming**. IEC Std 61131-7., 2000.

IEEE Standard Common Format for Transient Data Exchange (COMTRADE) for Power Systems, 1999.

JANG, J. S. R. ANFIS: Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System. **IEEE Trans. Syst. Man. Cybern. Vol.23, nº.3**, 1993. 665- 685.

JAZEBI, S.; VAHIDI, B.; HOSSEINIAN, S. H. E. F. J. Magnetizing inrush current identification using wavelet based gaussian mixture models. **Simulation Modelling Practice and Theory, Volume 17, Issue 6**, July 2009. 991-1010, ISSN 1569-190X.

JENSEN, A.; HARBO, A. L. C. **A Ripples in Mathematics: The Discrete Wavelet Transform**. New York: Springer-Verlag, 2000.

KINDERMANN, G. **Proteção de Sistema Elétricos de Potência**. Porto Alegre: Editora Sagra DC Luzzato, 1999.

KUMBHAR, G. B.; KULKARNI, S. V. Analysis of Sympathetic Inrush Phenomena in Transformers Using Coupled Field-Circuit Approach. **Power Engineering Society General Meeting, 2007. IEEE** , June 2007. 1-6, 24-28.

LIN, X.-N.; LIU, P. The ultra-saturation phenomenon of loaded transformer energization and its impacts on differential protection. **Power Delivery, IEEE Transactions on** , vol.20, no.2, April 2005. 1265-1272.

MELO, M. O. B. C. Avaliação do impacto da qualidade de energia elétrica na produção industrial: proposta de metodologia. **Produto & Produção**, v. 9, n. 3, p. 15-25, Out. 2008.

MENDEL, J. M. Fuzzy Logic System of Engineering: A Tutorial. **Proceedings of the IEEE** **83**, p. 345-377, 1995.

MESUT, E. B.; JINSANG, K. A Classifier for Distribution Feeder Overcurrent Analysis. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. **21**, n. **1**, Jan. 2006. 456-462.

MEYER, S. K. Power quality event analysis using wavelet feature based fuzzy classification. **Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2008. T&D. IEEE/PES**, April 2008. 1-6, 21-24.

MOHAN, N. **Computer Exercises for Power Electronics Education**. Departament of Electrical Engineering, University of Minessota, 1990.

MONARO, R. M. et al. Detecção e correção de sinais de transformadores de corrente distorcidos pela saturação através de redes neurais artificiais. **XVIII Congresso Brasileiro de Automática**, 2010.

NAYLOR, T. **Computer simulation experimets with models of economic systems**. John Wiley & Sons, 1971.

OLESKOVICZ, M. **Apostila - Qualidade da Energia**. São Carlos: Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia Elétrica, 2007.

OLIVEIRA, M. O.; BRETAS, A. S. Application of Discrete Wavelet Transform for differential protection of power transformers. **PowerTech, 2009 IEEE Bucharest**, June-July 2009. 1-8.

PRIKLER, L.; HOIDALEN, H. K. **Alternative Transient Program - Rule Book**. Leuven EMTP Center, 1997.

PRIKLER, L.; HOIDALEN, H. K. **ATPDRAW version 3.5 for Windows 9x/NT/2000/XP User's Manual**. 2002.

RAHMATI, A. An adaptive differential relay for CT saturation based on wavelet Transform. **Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2010 IEEE PES** , April 2010. 1-6, 19-22.

RUSS, E.; SIMPSON, P.; DOBBINS, R. **Computational Intelligence PC tools**. London: AP Professional, 1996.

SCHILDT, H. **C Completo e Total, 3 ed.** São Paulo: Mackron Books, 1996.

SEGATTO, E. C. **Relé Diferencial para Transformadores de Potência utilizando Ferramentas Inteligentes**. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2005.

SENGUL, M. et al. Case study of sympathetic interaction between transformers caused by inrush transients. **International Conference on Power Systems Transients** , Jun. 2005.

TOUSIGNANT, D.; BOLDUC, L.; DUTIL, A. A method for the indication of power transformer saturation. **Electric Power Systems Research**, Volume 37, Issue 2, May 1996. 115-120 , ISSN 0378-7796, DOI: 10.1016/0378-7796(96)01046-2.

TRIPATHY, M. Power transformer differential protection using neural network Principal Component Analysis and Radial Basis Function Neural Network. **Simulation Modelling Practice and Theory**, Vol. 18, Issue 5 , May 2010. 600-611.

VAZQUEZ, E. et al. Transformer Differential Protection Using Principal Component Analysis. **Power Delivery, IEEE Transactions on** , vol.23, no.1, Jan. 2008. 67-72.

WALKER, J. S. **A Primer on Wavelets and Their Scientific Applications**. Washington - USA: Chapman & Hall/ CRC, 1999.

WENG, H.; LIN, X.; LIU, P. Studies on the Operation Behavior of Differential Protection During a Loaded Transformer Energization. **Power Delivery, IEEE Transactions on** , vol.22, no.3, July 2007. 1386-1391.

WENGLI, H.; LIN, X. Studies on the Unusual Maloperation of Transformer Differential Protection During the Nonlinear Load Switch-In. **Power Delivery, IEEE Transactions on** , vol.24, 2009. 1824-1831.

WISZNIEWSKI, A. et al. Ultrasaturation Phenomenon in Power Transformers—Myths and Reality. **Power Delivery, IEEE Transactions on** , vol.23, no.3, July 2008. 1327-1334.

YAGER, R. R.; ZADEH, L. A. **An Introduction to Fuzzy Logic Application in Intelligent Systems**. Kluwer Academic Publishers, 1992.

YU, C.-S. Detection and Correction of Saturated Current Transformer Measurements Using Decaying DC Components. **Power Delivery, IEEE Transactions on** , vol.25, no.3, July 2010. 1340-1347.

YU, D. C. et al. Correction of current transformer distorted secondary currents due to saturation using artificial neural networks. **Power Delivery, IEEE Transactions on** , vol.16, no.2, Apr. 2001. 189-194.

ZIMMERMANN, H. **Fuzzy Set Theory and its Applications**. Kluwer Academic Publishers, 2001.