Hermes Manoel Galvão Castelo Branco

**Uma Estratégia para a Detecção e Classificação de
Transitórios em Transformadores de Potência pela
Utilização da Transformada *Wavelet* e da Lógica *Fuzzy***

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 Engenharia Elétrica

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

Sumário

Resumo	ix
Abstract	xi
Lista de Figuras	xiii
Lista de Tabelas	xvii
Lista de Abreviaturas e Siglas	xix
1 Introdução	1
2 Revisão Bibliográfica	5
2.1 A Proteção Diferencial de Transformadores de Potência	6
2.1.1 Corrente de Energização	9
2.1.2 Sobreexcitação do Transformador	11
2.1.3 Saturação dos Transformadores de Corrente	12
2.1.4 Energização Solidária	13
2.2 A Qualidade da Energia Elétrica no Contexto em Análise	16
2.3 Técnicas Empregadas no Desenvolvimento desta Pesquisa	17
2.3.1 Conceitos Básicos sobre a Transformada <i>Wavelet</i>	18
2.3.2 Conceitos sobre a Lógica <i>fuzzy</i>	26
2.4 Publicações Pertinentes ao Tema Proposto	33
3 Simulação Computacional do Sistema Elétrico de Potência	41
3.1 Breve Introdução ao ATP	42
3.2 O Sistema Elétrico Analisado	44
3.3 Pré-processamento dos Sinais Originários do ATP	50
3.3.1 Filtragem do Sinal	51
3.3.2 Conversão Analógico/Digital	53

3.3.3	Correção da Defasagem	54
3.3.4	Eliminação da Corrente de Sequência Zero	56
4	O Algoritmo Proposto	59
4.1	O Algoritmo Proposto	59
4.1.1	Aquisição e Condicionamento dos Dados	59
4.1.2	Aplicação da TWP para Obtenção das Entradas do Classificador	60
4.1.3	O SF modelado	65
4.1.4	A Classificação Final do Evento Transitório	70
5	Avaliação do Algoritmo Implementado	73
5.1	Faltas Internas ao Transformador TR2E	73
5.1.1	Faltas Fase-Terra Internas ao Transformador	73
5.1.2	Faltas Internas ao Transformador Envolvendo as Fases “A” e “B”	75
5.1.3	Faltas Internas Entre Espiras da Mesma Fase do Transformador	76
5.2	Sobreexcitação dos Transformadores TR2E e TR3E	77
5.3	Energização do Transformador TR2E	79
5.3.1	Energização Solidária do Transformador TR3E	80
5.4	Energização do Transformador TR2E Sob Falta Interna	82
5.4.1	Efeito do Paralelismo em TR3E Durante a Eenergização do Transformador TR2E Sob Falta Interna	84
6	Observações Finais	91
	Referências Bibliográficas	95

Dedicatória

*Aos meus pais, Hermes e Margarida, por
todo o amor e carinho que têm por mim.*

Agradecimentos

Aos meus pais, Hermes e Margarida, pelo amor, paciência, incentivo, apoio e esforço.

À Nayra, pela amizade e carinho, apesar da distância.

Ao Professor Mário Oleskovicz, pela oportunidade para a realização deste trabalho, e pela dedicação e paciência durante a orientação.

Aos Professores Denis Coury e José Carlos pelo incentivo e atenção dispensada em todos os momentos.

Aos demais professores e funcionários da USP - São Carlos, que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

Aos amigos, companheiros e ex-companheiros de república: Aldir, Helson, Clenilson, Junior e Kostela, pelos momentos de divertimento e pelo apoio nas horas de dificuldades.

Aos conterrâneos do Piauí, que compartilharam de momentos de alegria e de saudades durante toda a minha estadia em São Carlos. Em especial agradeço a Guilherme, Ricardo e Ronildo, com quem estabeleci grandes amizades.

Ao LSEE (Laboratório de Sistemas de Energia Elétrica) pela acomodação e equipamentos disponibilizados para o desenvolvimento desta pesquisa.

Aos amigos e companheiros do LSEE: Letícia, Etienne, Patrick, Sérgio, Lucas, Gerson, Ulisses, Monaro, Janison, Marcelo, Wesley, Raphael, Marcel e Rubens, dentre outros, pela amizade e contribuições. Um agradecimento especial para o amigo Daniel Barbosa, que fez contribuições indispensáveis para a concretização deste trabalho e mostrou-se sempre disposto e solícito para ajudar com o que fosse possível. Agradeço também ao companheirismo dos amigos e colegas da pós-graduação dos demais laboratórios da EESC e do ICMC.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela concessão da bolsa de mestrado e pelo apoio financeiro para a realização desta pesquisa.

Resumo

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***. 100 f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2009.

Nesta pesquisa, apresentam-se os principais eventos relacionados com a proteção de transformadores e sua correlação com os distúrbios de Qualidade da Energia Elétrica (QEE). Neste sentido, foi desenvolvido um algoritmo que utiliza a Transformada *Wavelet* (TW) e a Lógica *Fuzzy* (LF) para classificar os eventos transitórios associados à proteção de transformadores. Estes eventos foram observados em um Sistema Elétrico de Potência (SEP) simulado com a utilização do *software Alternative Transients Program* (ATP). Importa ressaltar que o sistema modelado apresenta transformadores ligados em paralelo, possibilitando o estudo de eventos decorrentes desta situação, como a energização solidária (*Sympathetic Inrush*). Por este SEP, modelado sobre parâmetros reais, foram simuladas várias situações transitórias, que provocam o aparecimento de correntes diferenciais, sendo estas direcionadas para análise do algoritmo desenvolvido. Afirma-se que, nos testes realizados, o algoritmo proposto apresentou um desempenho satisfatório perante as mais variadas situações a que foi submetido, identificando as causas das correntes diferenciais, sejam proporcionadas por defeitos ou por outras condições de operação aplicadas.

Palavras-Chave:

Transformadores de Potência; Proteção de Transformadores; Qualidade da Energia Elétrica (QEE); *Alternative Transients Program* (ATP); Transformada *Wavelet* (TW); Lógica *Fuzzy* (LF); Energização Solidária.

Abstract

BRANCO, H. M. G. C. **A Strategy for Detection and Classification of Transients in Power Transformers Using of Wavelet Transform and Fuzzy Logic.** 100 f. Dissertation (Master) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2009.

In this research, the main events related to the transformer protection and its correlation with the Power Quality disturbances (PQ) are presented. In this context, an algorithm based on Wavelet Transform (WT) and Fuzzy Logic (FL) was developed to classify the transient events associated with the transformer protection. These events were observed in an Electrical Power System (EPS) simulated using the Alternative Transients Program (ATP) software. It should be emphasized that the modeled system presents transformers connected in parallel, allowing the study of events of this situation, such as sympathetic inrush. For the simulated EPS, modeled based on real parameters, various transients situations were simulated, causing the appearance of differentials currents which were directed to the analysis. The proposed algorithm showed a satisfactory performance to many situations, identifying the causes of the differentials currents, either provided by faults or other operation conditions.

Keywords:

Power Transformer; Transformer's Protection; Power Quality (PQ); Alternative Transients Program (ATP); Wavelet Transformer (WT); Fuzzy Logic (FL); Sympathetic Inrush.

Lista de Figuras

2.1	A proteção diferencial para transformadores.	7
2.2	Correntes observadas quando de uma situação de falta interna aplicada ao transformador principal (protegido).	8
2.3	Correntes observadas quando de uma situação de energização (<i>inrush</i>).	11
2.4	Correntes observadas quando de uma situação de sobreexcitação do transformador.	12
2.5	Correntes observadas quando de uma falta externa incorrendo na saturação do TC alocado.	13
2.6	Correntes observadas quando de uma situação de “ <i>Sympathetic Inrush</i> ”.	14
2.7	Formas básicas de algumas funções <i>wavelets</i> que são dilatadas e transladadas para serem utilizadas na TW. Adaptado de: Addison (2002).	19
2.8	Dilatação de uma <i>wavelet</i>	20
2.9	Translação de uma <i>wavelet</i>	21
2.10	A decomposição de um sinal pela TW.	24
2.11	Árvore de coeficientes quando da aplicação da TWP até o terceiro nível.	25
2.12	Tipos de funções de pertinência <i>fuzzy</i>	28
2.13	Exemplo de uma variável lingüística e seus atributos.	31
2.14	Estrutura de blocos dos módulos de um SF.	32
3.1	Sistema elétrico simulado e em análise.	45
3.2	Parte do arquivo do ATP exemplificando o formato de entrada do cartão para modelagem do transformador.	46

3.3	Modelo do transformador utilizado, exemplificando as partições do enrolamento primário para simulações de faltas internas. Adaptado de: Bernardes (2006).	47
3.4	valores utilizados para variação dos ângulos de fase na aplicação de faltas.	47
3.5	Parte do arquivo do ATP com as chaves utilizadas para aplicação de faltas internas no primário do transformador.	48
3.6	Fluxograma das etapas de processamento consideradas.	52
4.1	Fluxograma básico do algoritmo proposto.	60
4.2	Árvore de decomposição da TWP de nível 4.	62
4.3	Sinal gerado matematicamente com conteúdo harmônico conhecido e analisado por várias <i>wavelets</i>	63
4.4	Estrutura do SF utilizado.	65
4.5	Funções de pertinência das variáveis lingüísticas do SF modelado.	66
4.6	Síntese das regras do SF modelado.	69
4.7	Exemplo do procedimento de inferência <i>fuzzy</i> para entradas que ativaram quatro regras.	70
4.8	Exemplo do procedimento de inferência <i>fuzzy</i> para entradas que ativaram todas as regras.	71
4.9	Procedimento para classificação final do evento observado.	72
5.1	Classificação do evento observado por TR2E durante uma falta interna ocorrida neste transformador.	75
5.2	Saída do algoritmo aplicado ao transformador TR3E durante uma falta interna ocorrida em TR2E.	76
5.3	Classificação do transitório observado em TR2E durante uma falta interna envolvendo as espiras a 50% e 10% do enrolamento primário da fase “A” aplicada neste transformador com ângulo de falta de 60°.	79
5.4	Classificação do transitório observado em TR2E durante uma sobreexcitação em virtude de uma elevação da tensão à 118% da nominal.	80

5.5	Classificação do transitório observado em TR2E durante uma sobreexcitação em virtude de uma elevação da tensão à 128% da nominal.	81
5.6	Resposta do algoritmo durante uma situação de energização de TR2E.	83
5.7	Resposta do algoritmo durante uma situação de energização de TR2E em que não foi possível a detecção da energização solidária do transformador TR3E. . . .	84
5.8	Resposta do algoritmo durante uma situação de energização de TR2E em que ficou caracterizada a energização solidária do transformador TR3E.	85
5.9	Resposta do algoritmo durante uma situação de energização de TR2E sob falta interna.	87
5.10	Resposta do algoritmo para análises de TR3E durante uma situação de energização de TR2E sob falta interna no secundário.	87

Lista de Tabelas

2.1	Faixas de frequência da aplicação da TWP ilustrada na Figura 2.11.	26
3.1	Situações simuladas de faltas internas ao transformador.	49
3.2	Situações simuladas de energização do transformador.	49
3.3	Situações simuladas de energização do transformador sob falta interna.	50
3.4	Situações simuladas de sobreexcitação do transformador.	50
3.5	Quantidade de eventos analisados.	51
4.1	Faixas de frequência quando da aplicação da TWP nível 4 à cada janela do sinal de corrente.	62
4.2	Faixas de frequência da TWP nível 4 de uma janela do sinal de corrente.	63
5.1	Análises de TR2E quando da aplicação de faltas internas fase “A”-“terra” no secundário deste transformador.	74
5.2	Análises de TR2E quando da aplicação de faltas internas fase-fase.	77
5.3	Análises de TR2E quando da aplicação de faltas internas entre espitas.	78
5.4	Análises de TR2E e TR3E quando de uma sobreexcitação.	82
5.5	Análises de TR2E durante procedimentos de energização.	83
5.6	Análises de TR3E durante procedimentos de energização de TR2E.	84
5.7	Análises de TR2E quando da energização de um transformador sob falta interna no primário.	86

5.8	Análises de TR2E quando da energização de um transformador sob falta interna no secundário.	88
5.9	Análises de TR3E durante o procedimento de energização de TR2E sob falta interna no secundário do transformador.	89

Lista de Abreviaturas e Siglas

AMR *Análise Multiresolução*

ATP *Alternative Transients Program*

CAD *Conversor Analógico/Digital*

DC *Direct Current*

DHT *Distorção Harmônica Total*

EMTP *Eletromagnetic Transient Program*

IEC *International Electrotechnical Commission*

LF *Lógica Fuzzy*

LSEE *Laboratório de Sistemas de Energia Elétrica*

LVQ *Learning Vector Quantization*

MIT *Motor de Indução Trifásico*

MLP *Multi-Layer Perceptron*

RMS *Root Mean Square*

RNAs *Redes Neurais Artificiais*

QEE *Qualidade da Energia Elétrica*

SEP *Sistema Elétrico de Potência*

SF *Sistema Fuzzy*

SI Sistemas Inteligentes

TC Transformador de Corrente

TF Transformada de *Fourier*

TW Transformada *Wavelet*

TWC Transformada *Wavelet* Contínua

TWD Transformada *Wavelet* Discreta

TWP Transformada *Wavelet Packet*

VTCD Variações de Tensão de Curta Duração

Capítulo 1

Introdução

Como fato, tem-se que a ocorrência de surtos ou situações transitórias é freqüentemente observada sobre o Sistema Elétrico de Potência (SEP), podendo provocar o funcionamento anormal do mesmo, em virtude de algum tipo de falta ou por manobras de equipamentos conectados à rede. Essas condições de operação são indesejáveis e podem oferecer riscos aos usuários e equipamentos conectados ao SEP. Para evitar maiores danos ao sistema e aos consumidores, fica evidente a importância de se detectar o mais rápido possível o início de um distúrbio, bem como determinar a ação ou não dos dispositivos de proteção que irão amenizar o efeito, e deixar o sistema apto a retornar à condição normal de operação (Coury *et al.*, 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. Nesse sentido, vários métodos de proteção foram propostos, e estão em constante avaliação, a fim de garantir uma operação normal deste equipamento, evitando que ele continue em funcionamento sob situações adversas e indesejáveis como, por exemplo, situações de falta interna aos seus enrolamentos.

Vale lembrar que a filosofia mais aplicada para a proteção dos transformadores de potência dá-se pela análise das correntes diferenciais, como aponta Kindermann (2006). Entretanto, esta técnica está sujeita a algumas imprecisões, uma vez que determinadas condições normais de operação dos transformadores possuem características semelhantes às de situações indesejadas.

Deste cenário ainda generalizado, vale apontar que em função de uma correta ou não operação da proteção aplicada aos transformadores, têm-se associado aos tempos de atuações decorrentes, a possibilidade de caracterização de vários problemas relacionados à Qualidade

da Energia Elétrica (QEE).

Assim, evidencia-se a importância de uma análise e diagnóstico da correta ou não operação do sistema de proteção, atrelando os resultados observados à QEE, no intuito de se determinar as causas e as consequências dos distúrbios no sistema, além de apresentar medidas técnicas e economicamente viáveis para solucionar o problema. É importante salientar que vários eventos de QEE estão associados com situações transitórias típicas da proteção de transformadores (Zheng *et al.*, 2004; Santos *et al.*, 2000), fato que justifica o interesse em classificar os eventos transitórios verificados nos transformadores, com o objetivo de subsidiar as análises relacionadas à QEE.

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 é claro, de interromper indevidamente o fornecimento da energia. Com a ocorrência de distúrbios de QEE as concessionárias podem, além de não dispor do seu produto "energia", sofrer penalizações por parte dos órgãos de fiscalização e os consumidores terem seus processos produtivos paralisados, ou seus equipamentos danificados. Ressalta-se que todos os casos citados ocasionam perdas econômicas consideráveis em todos os setores envolvidos.

Com o intuito de diminuir as perdas causadas tanto às concessionárias quanto aos consumidores, vários estudos vêm sendo desenvolvidos, buscando novos métodos de detecção e classificação de distúrbios que sejam mais rápidos e eficientes. No entanto, a maioria destes trabalhos se propõe a observar a proteção, em específico, de forma separada da QEE, ou vice-versa. Neste contexto, propõe-se um algoritmo para detecção e classificação automatizada de vários distúrbios, observados sobre determinado sistema de proteção, possibilitando associá-los ao contexto da QEE, sempre que possível. Cabe adiantar que o algoritmo proposto foi implementado sobre duas teorias bastante empregadas atualmente nos estudos relacionados à proteção digital e à QEE, que são a Transformada *Wavelet* (TW) e Lógica *Fuzzy* (LF).

Funcionalmente, o algoritmo proposto é capaz de **detectar e diferenciar as correntes de falta interna** ao transformador das correntes transitórias que não devem sensibilizar a proteção aplicada ao mesmo. As situações transitórias observadas no escopo deste trabalho, além das faltas internas, são: **correntes de *inrush***, situações de **sobreexcitação** e de ***sympathetic inrush***. Cabe comentar que esta última situação será passível de observação em virtude do paralelismo

entre os transformadores, que será posteriormente caracterizado sobre o sistema elétrico em análise.

Um ponto interessante a se destacar no trabalho é a possibilidade de se estudar os distúrbios de QEE decorrentes deste **paralelismo dos transformadores**, uma vez que a maioria dos estudos realizados não contempla tal situação, considerando os transformadores energizados e operados de forma isolada no sistema.

Vale adiantar que, pela lógica implementada, todas as considerações são de suma importância no tocante à proteção do transformador, pois será possível verificar quando os dispositivos agregados teriam de tomar a decisão de atuação/operação (*TRIP*) ou de não atuação sobre determinada ocorrência.

Para testar e validar toda a abordagem proposta, coloca-se para o momento que o sistema elétrico em análise foi caracterizado via simulação computacional dispondo do *software Alternative Transients Program* (ATP). Cabe comentar que o ATP permite uma representação detalhada dos diversos componentes do SEP aqui estudados, além da caracterização de diversas condições de operações e situações que possam vir a afetar os mesmos. Outro ponto a ser destacado, e que vai ficar evidente pela apresentação do trabalho, é o processo de uso dos arquivos fontes (máscaras) do ATP, sem o qual não seria possível aplicar e analisar várias das situações que serão reportadas.

Em termos de organização, o presente documento encontra-se dividido em outros cinco (5) capítulos, além desta introdução. O segundo capítulo apresenta os principais conceitos sobre a proteção de transformadores e sobre a QEE. Também são expostas as teorias acerca das técnicas utilizadas na composição do algoritmo proposto. Ainda neste capítulo, comenta-se alguns dos trabalhos observados na elaboração deste documento, denotando o estado da arte no que se refere à proteção de transformadores e à QEE. O terceiro capítulo apresenta o sistema elétrico simulado, enquanto o quarto descreve o algoritmo proposto e o quinto os resultados obtidos com a sua aplicação. O último capítulo apresenta as conclusões obtidas a partir desse estudo, bem como as propostas passíveis para a continuação da pesquisa.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

O SEP encontra-se em constante desenvolvimento e expansão e, ao longo do tempo, novos equipamentos e tecnologias são incorporadas ao mesmo, o que causa mudança nas suas configurações e em seu comportamento. Em decorrência dessa evolução, faz-se necessário melhorar constantemente o monitoramento, a proteção e demais procedimentos realizados sobre o SEP. Em busca dessa melhoria, várias pesquisas são realizadas, direcionadas às novas metodologias e ferramentas a serem aplicadas no SEP. Tais aplicações são pertinentes devido, principalmente, ao desenvolvimento dos microprocessadores, sobretudo nos últimos anos, o que veio a proporcionar melhorias no monitoramento do sistema, permitindo a medição de um maior número de parâmetros e variáveis, representadas por uma adequada taxa de amostragem. Este avanço tecnológico permitiu a aplicação de novas técnicas, principalmente as computacionais, nos mais distintos fins. Dentre as técnicas sugeridas atualmente, destacam-se a TW, e os Sistemas Inteligentes (SI), que serão foco dos apontamentos que seguem.

A TW tem uma vasta aplicação em sistemas de potência, como pode ser conferido em Lee *et al.* (2000), onde os autores citam diversos trabalhos e dão uma visão geral das possibilidades de aplicação desta ferramenta em SEP. Conforme observado, a TW pode ser utilizada para detecção, localização e classificação de distúrbios, para proteção de diversos componentes do SEP, para compressão e armazenamento de dados e estimação de componentes harmônicos, dentre outras aplicações.

A utilização de SI em SEP também é vasta, com a possibilidade de aplicação em várias situações. Bansal (2003) apresenta um levantamento bibliográfico mostrando a utilização de Sistema *Fuzzy* (SF) em várias áreas relacionadas ao SEP. Em Kezunovic (2000) foi realizado um

levantamento bibliográfico sobre a aplicação de ferramentas inteligentes à proteção de SEP. Na época deste levantamento, foi apontado que Redes Neurais Artificiais (RNAs) eram uma das ferramentas inteligentes mais empregadas em aplicações de proteção (55%), seguida de sistemas especialistas (37%) e por LF (8%). Tripathy *et al.* (2005) comenta sobre os avanços relacionados à proteção de transformadores. Os autores relatam que várias melhorias foram permitidas pela utilização de sistemas inteligentes, em especial, quando da utilização de RNAs e LF, com as quais se consegue transpor alguns dos problemas enfrentados por métodos tradicionalmente empregados.

Neste capítulo serão apresentados comentários e considerações sobre as técnicas e conceitos relacionados com a proteção dos transformadores. Também serão expostos alguns conceitos referentes à QEE e o relacionamento entre a atuação (ou não atuação) da proteção do transformador e suas conseqüências para o SEP como um todo. Posteriormente, serão apresentados os conceitos básicos referentes às técnicas empregadas no desenvolvimento desta pesquisa, bem como um levantamento das principais publicações pertinentes ao contexto delineado. A Seção 2.3.1 apresentará conceitos relevantes para o entendimento da TW, tanto da forma contínua, quanto da discreta. Ainda na Seção 2.3.1, comenta-se da implementação da Transformada *Wavelet* Discreta (TWD) e da Transformada *Wavelet Packet* (TWP) por meio de bancos de filtros. Já na Seção 2.3.2, serão feitas considerações a respeito da LF e de importantes características da teoria da lógica nebulosa. Para finalizar o capítulo, a Seção 2.4 ilustrará algumas das aplicações envolvendo as ferramentas aplicadas à proteção de transformadores e à QEE.

2.1 A Proteção Diferencial de Transformadores de Potência

Desde o surgimento do SEP, várias filosofias de proteção foram desenvolvidas objetivando evitar que o sistema, ou alguma parte e/ou componentes em específico, continue operando em condições anormais de funcionamento. Para os transformadores, em particular, o principal método aprimorado foi o da proteção diferencial, no qual o relé compara as correntes que entram (primárias) e saem (secundárias) do equipamento ou sistema protegido (Horowitz e Phadke, 1995). O constante aprimoramento das técnicas de proteção e, neste caso, da proteção diferencial propiciou o surgimento de diversos esquemas, que têm como princípio básico de funcionamento a filosofia diferencial.

Como prática, tem-se que a metodologia de proteção mais empregada em transformadores

é a diferencial percentual (Kindermann, 2006). A base de funcionamento desta metodologia é a filosofia diferencial, que tem seus elementos ilustrados na Figura 2.1. A Figura 2.1 mostra, também, o esquema de conexão dos Transformadores de Corrente (TCs) acoplados em série ao ramo primário e ao secundário. Nesta, $N_p:N_s$ é a relação de transformação entre o primário e o secundário do transformador protegido. Na figura, I_p representa a corrente no primário e I_s a corrente no secundário do transformador, enquanto V_p e V_s representam as tensões no primário e secundário do transformador, respectivamente. As relações $1:N_1$ e $1:N_2$ ilustram as relações de transformação dos Transformador de Corrente (TC)s conectados ao lado primário e secundário do transformador de potência, enquanto I_{ps} e I_{ss} correspondem as correntes nos secundários dos TCs conectados, respectivamente, ao primário e secundário do equipamento protegido. Vale lembrar que I_{ps} e I_{ss} são as grandezas realmente utilizadas pelo dispositivo de proteção alocado junto ao equipamento a ser salvaguardado.

Figura 2.1: A proteção diferencial para transformadores.

Como fato, tem-se que durante a operação normal do transformador, e em caso de faltas externas, as correntes secundárias dos TCs (I_{ps} e I_{ss}) são iguais, desde que $N_p/N_s = N_1/N_2$. Todavia, no caso de ocorrência de uma falta interna ao transformador, ocorre a inversão do sentido da corrente do lado secundário, uma vez que ela passa a alimentar a falta interna, em vez de fluir no sentido das cargas. Este fato faz com que a diferença entre as correntes I_{ps} e I_{ss} seja expressiva, provocando a sensibilização da proteção associada. Neste caso, a corrente diferencial (i_d) fornece uma medida confiável da corrente de falta, podendo ser definida como:

$$i_d = i_{ps} + i_{ss}. \quad (2.1)$$

A Figura 2.2 ilustra as formas de onda das correntes no primário e no secundário do transformador, bem como a corrente diferencial que surge durante uma situação de falta interna aplicada no primário do transformador principal (protegido).

Figura 2.2: Correntes observadas quando de uma situação de falta interna aplicada ao transformador principal (protegido).

Contudo, associada à configuração como um todo, existem várias e prováveis fontes de imprecisões que podem comprometer o funcionamento do sistema de proteção, acarretando em uma atuação errônea deste, visto que pequenas correntes diferenciais podem também surgir em condições normais de operação. Porquanto, as imprecisões que podem comprometer o correto funcionamento da filosofia diferencial estão associadas com cinco principais fontes de erros enumeradas por Kindermann (2006). As mesmas passam por:

1. Erros em virtude das discrepâncias entre as relações de transformação dos TCs de medição do lado de alta e baixa do transformador protegido;
2. Erros dos TCs, relativos às suas classes de exatidão principalmente no momento de elevadas correntes de curto-circuito;
3. Erros associados com a comutação dos *taps* dos transformadores de potência;
4. Erros devido a discrepância dos *taps* nas bobinas de restrição do relé;
5. Erro inserido como uma margem de segurança para a operação do relé.

A soma de todos esses possíveis erros que venham a acontecer origina uma imprecisão que deve ser levada em consideração quando do ajuste do relé. Para contornar os problemas supracitados, fixa-se um valor, que deve ser maior que o erro total que possa aparecer nas correntes diferenciais, a partir do qual o relé deverá atuar. Este valor pode ser considerado respeitando-se as Equações (2.2) e (2.3) que seguem.

$$i_d \geq K, \quad (2.2)$$

$$i_d \geq \bar{K} \left(\frac{i_{ps} - i_{ss}}{2} \right), \quad (2.3)$$

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

Além dos ajustes acima mencionados, certos tipos de manobras operacionais nos transformadores podem causar o aparecimento de correntes diferenciais que não são de defeito, mas que podem sensibilizar a proteção diferencial percentual. Entretanto, para estas situações, não se deseja que a proteção atue, pois as mesmas não consistem em faltas internas ao transformador protegido. Algumas destas manobras, muitas das vezes, resultam em eventos relacionados à QEE, ou então, são decorrentes do aparecimento de tais eventos. Assim, torna-se necessário um estudo sobre estes tipos de manobras, evidenciando-se a situação que provocou a sensibilização da proteção diferencial do transformador. Com a caracterização da situação observada no transformador (falta interna ou uma das demais situações indesejáveis à proteção), pode-se avaliar a consequência desta e da respectiva decisão da proteção para o sistema como um todo, inclusive do ponto de vista da QEE. As causas primordiais para o surgimento destas correntes diferenciais indesejáveis ao sistema de proteção são listadas no que segue.

2.1.1 Corrente de Energização

A corrente de energização ocorre devido a magnetização e a saturação do núcleo do transformador quando do seu início de operação. Este evento tem a sua amplitude determinada pela inclinação da característica de magnetização na região saturada, e pela indutância de escoamento do transformador, como lembrado por Bernardes (2006). Como prática, tem-se que durante o procedimento de energização o secundário do transformador permanece em aberto, apresentando corrente nula. Entretanto, a corrente do lado primário é elevada devido à energização. Esta situação causa o aparecimento de altas correntes diferenciais, as quais podem

sensibilizar e operar, indevidamente, a proteção associada. O efeito transitório originado pode persistir por vários segundos até a condição de regime permanente ser alcançada e provocar, no intervalo de tempo de sua duração, um desnecessário desligamento de parte do sistema, fato este contrário aos objetivos da proteção.

Como observado na literatura (Kindermann, 2006; Coury *et al.*, 2007), a corrente de magnetização, na situação de regime permanente, comumente representa de 1% a 2% da corrente nominal, podendo, no entanto, alcançar valores bastante elevados, quando da energização do transformador. O equacionamento descrevendo a situação de energização pode ser encontrado em Oliveira *et al.* (1984). Cabe colocar que em virtude da referida corrente, ocorre, momentaneamente, uma queda na tensão alimentadora com a provável atuação instantânea dos relés associados. Conforme apresentado por Oliveira *et al.* (1984), o valor atingido na fase transitória dependerá de dois fatores:

- a) Do ponto do ciclo referente à tensão, no qual a chave para a energização é fechada, e
- b) Das condições magnéticas do núcleo, incluindo a intensidade e a polaridade do fluxo residual.

Para ilustrar a situação de energização, apresenta-se a Figura 2.3, onde se observa uma elevada corrente presente no lado primário do transformador, caracterizada pela forte contribuição da componente de segundo harmônico. Percebe-se, também, que a corrente é praticamente nula no lado secundário durante todo o procedimento de energização.

Dos apontamentos consultados, tem-se que os harmônicos de 2ª ordem, os quais caracterizam a situação de energização, alcançam valores típicos de 16% da componente de frequência fundamental, e, em alguns casos, chegam a atingir até 70% da mesma (Pihler *et al.*, 1997). Já no caso de uma real situação de falta, a menos de um possível decaimento do componente *Direct Current* (DC), os componentes harmônicos estarão limitados à frequência do sistema (60 Hz). Neste sentido, como a assinatura da forma de onda frente a uma energização será rica no componente de segunda ordem, utiliza-se da análise deste conteúdo harmônico para caracterizar uma restrição da operação do relé (Coury *et al.*, 2007).

Figura 2.3: Correntes observadas quando de uma situação de energização (*inrush*).

2.1.2 Sobreexcitação do Transformador

Da literatura correlata, tem-se que o fluxo de magnetização dentro do núcleo do transformador é diretamente proporcional à tensão aplicada, e inversamente proporcional à frequência do sistema (Bernardes, 2006). Durante a rejeição de carga, e outras condições de operação, o transformador pode estar sujeito a sobretensões em regime permanente, as quais podem saturar o seu núcleo, devido às suas características não lineares. Nesta condição, observa-se um alto conteúdo de harmônicos ímpares inseridos nas formas de onda coletadas, destacando-se as de terceira e quinta ordem, sendo que os harmônicos de quinta ordem aparecem em maior quantidade que os de terceira (Coury *et al.*, 2007). Nesta conjuntura, observa-se o aparecimento de correntes diferenciais indesejadas, que podem provocar uma atuação equivocada da proteção diferencial.

Para os transformadores mais novos a situação é ainda mais grave, uma vez que há a ocorrência de maiores distorções devido ao material constituinte do núcleo (Coury *et al.*, 2007). O monitoramento para bloqueio da operação, nesse caso, é executado em relação aos componentes de 5º harmônico das correntes diferenciais. Caso estes valores excedam a um limite pré-estabelecido, o relé associado pode bloquear a operação. Para ilustrar as correntes observadas

quando de uma situação de sobreexcitação de um transformador apresenta-se a Figura 2.4.

Figura 2.4: Correntes observadas quando de uma situação de sobreexcitação do transformador.

2.1.3 Saturação dos Transformadores de Corrente

A função dos TCs é transformar as correntes oriundas do sistema de potência em correntes de baixa magnitude, e fornecer isolamento galvânica entre a rede elétrica e os relés, ou outros instrumentos conectados ao seu enrolamento secundário.

Vale lembrar que os ajustes dos enrolamentos secundários dos TCs são usualmente padronizados entre 1 e 5A. Estes são valores nominais e os transdutores devem, portanto, ser projetados para tolerar valores maiores, oriundos de condições anormais de operação do sistema (Bernardes, 2006). Desta maneira, os TCs são concebidos para suportar correntes de falta e outros surtos, mas apenas por pouco segundos.

Em algumas situações de faltas externas e próximas aos TCs, as correntes registradas podem ser elevadas, podendo atingir valores de até 50 vezes a magnitude da corrente de carga nominal. Dado este fato, o TC alocado junto à ocorrência poderá ser levado à condição de saturação, criando, mais uma vez, uma falsa corrente diferencial que poderá ser mal interpretada pela

filosofia de proteção adotada (Segatto, 2005). A saturação dos TCs 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. A Figura 2.5 ilustra as correntes observadas devido a uma situação de falta externa próxima ao secundário do transformador com a conseqüente saturação do TC de medição correspondente.

Figura 2.5: Correntes observadas quando de uma falta externa incorrendo na saturação do TC alocado.

2.1.4 Energização Solidária

Conforme colocado por Oliveira *et al.* (1984), uma das mais importantes operações com transformadores é a ligação de vários destes equipamentos em paralelo, oferecendo uma maior confiabilidade no fornecimento de energia, ou mesmo, uma maior potência a um sistema elétrico. Entretanto, esta condição de paralelismo entre os transformadores é muitas das vezes ignorada pela literatura. Desta situação, para o cálculo tradicional das correntes de energização, assume-se que o transformador está isolado no sistema, não possuindo outros equipamentos conectados e desconsiderando o fenômeno da energização solidária (*Sympathetic Inrush*).

Na prática, porém, os equipamentos são energizados em paralelo com os demais dispositi-

vos, o que provoca transientes e sobretensões nos transformadores próximos, mesmo que estes estejam em operação normal (Bronzeado e Yacamini, 1995). O fato é que, de acordo com Sengül *et al.* (2005), este fenômeno, muitas das vezes, não caracteriza um componente de segunda harmônica suficiente para que haja bloqueio por restrição harmônica. Desta forma, o sistema de proteção poderá atuar indevidamente para situações de “*Sympathetic Inrush*”. Na Figura 2.6 é possível observar as formas de onda das correntes do primário e do secundário de um transformador ligado em paralelo com outro transformador sendo energizado, caracterizando a situação de energização solidária.

Figura 2.6: Correntes observadas quando de uma situação de “*Sympathetic Inrush*”.

Considerando os fatores anteriormente citados, várias pesquisas vêm se desenvolvendo ao longo dos anos, a fim de se obter um algoritmo que se mostre robusto e confiável, possibilitando distinguir corretamente as situações de faltas internas das situações indesejadas. Algumas das pesquisas desenvolvidas, que abordam estes aspectos, serão apresentadas no decorrer deste capítulo.

Nesta seção buscou-se evidenciar as principais características dos sistemas de proteção aplicados a transformadores de potência. Pelo que foi apresentado, verificou-se que a corrente mínima de operação (K) e a inclinação percentual diferencial ($\bar{K}$) assumem valores decisivos

(*crisp*), ajustados de acordo com a experiência dos engenheiros de proteção. Contudo, a tomada de decisão dos equipamentos de proteção, desde a aquisição dos dados até a chegada destes aos relés, está encoberta de incerteza e imprecisões. A presença de incertezas e imprecisões indica que a utilização de ferramentas que, mesmo na presença destas, funcionem adequadamente pode agregar ganhos ao processo como um todo. A LF é uma ferramenta que se encaixa bem no contexto apresentado, possibilitando a utilização de conjuntos *fuzzy* em substituição às constantes K e $\bar{K}$ apresentadas anteriormente. Sendo assim, os conceitos básicos sobre a LF serão introduzidos posteriormente neste capítulo.

Vale lembrar que a idéia de utilização de conjuntos *fuzzy* pode também ser aplicada para os valores das componentes harmônicas, geralmente segunda e quinta, observados nos sinais. O bloqueio da operação do relé é realizado quando os componentes harmônicos ultrapassam um certo valor, estabelecido pelos engenheiros com base em sua experiência de campo. Estes valores, representados por meio de um conjunto *crisp*, podem ser substituídos por valores qualitativos pretencentes a conjuntos *fuzzy*. Ainda em relação às faixas de frequências presentes nas formas de onda da corrente, estas podem ser investigadas com a utilização da TW. Esta ferramenta apresenta algumas vantagens em relação a Transformada de *Fourier* (TF), ferramenta tradicionalmente utilizada em SEP para análises no domínio da frequência. A TW será apresentada ainda neste capítulo de revisão bibliográfica, juntamente com a TWP - uma generalização da TW - que será utilizada no algoritmo proposto.

Um diferencial do algoritmo desenvolvido nesta dissertação de mestrado é utilizar um SF que recebe como entrada as características dos sinais, extraídas pela TWP, para classificar o evento que sensibilizou a proteção diferencial. Isto apresenta um ganho em relação aos algoritmos desenvolvidos até o momento que, na presença de correntes diferenciais, se preocupam apenas com a atuação ou com o bloqueio da operação dos relés. O fato de apontar o evento que sensibilizou a proteção possibilitará futuras análises referentes à distúrbios de QEE, buscando associá-los. Vale ressaltar que, pelo escopo apresentado, esta pesquisa busca evidenciar, além das situações normalmente abordadas, a situação de paralelismo entre transformadores, pouco lembrada nos reportes encontrados. A seguir tem-se um breve apontamento sobre a QEE no contexto abordado neste trabalho.

2.2 A Qualidade da Energia Elétrica no Contexto em Análise

Reportando-se agora à QEE, esta constitui, na atualidade, um fator crucial para a competitividade de praticamente todos os setores industriais e de serviços. Conceitualmente, a qualidade da energia está relacionada a um conjunto de alterações que podem ocorrer no sistema elétrico. Segundo Dugan *et al.* (2003), associa-se a 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 muito bem definidos de medidas para determinar a qualidade da tensão, buscando inferir uma forma de onda o mais próximo possível de uma senóide; 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 fornecedor de energia pode somente controlar a qualidade da tensão, mas não tem controle sobre a corrente que cargas particulares e ou específicas podem requerer (Dugan *et al.*, 2003). Portanto, o padrão aceito com respeito à QEE é direcionado a manter o fornecimento de tensão dentro de certos limites. Contudo, para manter o nível de tensão dentro de certos limites operacionais aceitáveis, tanto ao nível de transmissão como de distribuição, são necessárias medidas de controle e de acompanhamento dos órgãos de fiscalização e, também, das concessionárias fornecedoras de energia. Isto se deve ao fato de que os sistemas de transmissão e de distribuição estão constantemente sujeitos à ocasionais variações de tensão. Estas variações, mesmo dentro de limites pré-estabelecidos, podem causar operações incorretas de equipamentos elétricos nos diversos setores.

Como fato, tem-se que os problemas associados aos distúrbios de qualidade da energia 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 (Oleskovicz, 2004). 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 podem ser bem mais elevados. Por isto, atualmente, muitos esforços têm sido direcionados para amenizar os transtornos e prejuízos associados aos distúrbios da QEE.

Na literatura consultada, verifica-se que muitos dos eventos de QEE estão associados com situações típicas da proteção de transformadores. Cita-se Zheng *et al.* (2004), que busca iden-

tificar, dispondo da TW e das RNAs, a causa de um afundamento de tensão, indicando como uma possível causa a energização do transformador. Outro exemplo de trabalho que segue esta mesma linha pode ser encontrado em Santoso *et al.* (2000). Neste foi proposto a utilização de um sistema *fuzzy*, com dados de entrada processados pela TW e pela TF, capaz de caracterizar distúrbios relacionados à qualidade de energia referentes a três tipos de eventos distintos: energização de transformadores, operações de manobra e energização de banco de capacitores. Cita-se, ainda como exemplo de associação entre fenômenos de proteção de transformadores e QEE, a sobreexcitação do transformador, que pode ocorrer em virtude de condições de sobretensão e/ou subfrequência do sistema (Bernardes, 2006).

Como observado, tem-se que a atuação da proteção do SEP, também é responsável por inúmeros eventos relacionados com a QEE. A atuação de um sistema de proteção pode ser o responsável, por exemplo, pelo surgimento de Variações de Tensão de Curta Duração (VTCD), ou de interrupções (instantâneas, momentâneas, temporárias ou, até mesmo, permanentes e/ou sustentadas). Também é de conhecimento que a proteção de determinados equipamentos pode atuar erroneamente, em virtude de ocorrências de distúrbios de QEE, como por exemplo, quando da atuação da proteção de um transformador, em virtude da sobreexcitação do mesmo, ocasionada por uma elevação de tensão.

Tendo em vista os aspectos supracitados, vislumbra-se em uma etapa posterior desta pesquisa, apresentar o desenvolvimento de um classificador capaz de estabelecer a relação entre os eventos observados na proteção do transformador e a ocorrência de distúrbios de QEE no SEP. Tal classificador, terá uma importância considerável na melhoria, tanto da proteção, quanto da QEE do SEP. Acredita-se que por este estudo, será permitido melhores ajustes dos dispositivos de proteção alocados junto ao sistema. Além disto, com a análise dos dados de proteção e de qualidade, e com a correlação existente entre estes, será possível descobrir, sanar, ou ao menos mitigar, possíveis causas de diversos distúrbios relacionados à qualidade de energia.

2.3 Técnicas Empregadas no Desenvolvimento desta Pesquisa

Na presente seção serão abordados conceitos sobre as técnicas utilizadas no algoritmo desenvolvido neste trabalho.

2.3.1 Conceitos Básicos sobre a Transformada *Wavelet*

A 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. Além disto, esta ferramenta possibilita a análise de um sinal, simultaneamente, nos planos do tempo e da frequência.

Muitas das idéias por trás da TW existem há muito tempo, de acordo com FARIA (1997), desde 1910 com as descobertas de Haar . Entretanto, a utilização desta ferramenta começou a se desenvolver a partir de 1980. Esse desenvolvimento tem sido bem sucedido, e em consequência disso, atualmente, a TW é uma ferramenta bastante utilizada em diversas áreas como na matemática, física e engenharia. Conforme será exposto adiante, as análises que empregam a TW tem por base a utilização de funções que representam pequenas formas de onda (*wavelets*), que são utilizadas para transformar um sinal em análise, através de sua convolução com este sinal. Essas funções são manipuladas de duas formas, movendo-as sobre o sinal em estudo e dilatando-se (ou comprimindo-se) as mesmas.

A teoria sobre a TW pode ser explanada a partir de vários pontos de vista e, nesta seção, serão introduzidos os conceitos básicos sobre esta teoria. Consultando as referências Addison (2002); Jemse e Harb (2000); Walker (1999), o leitor terá acesso a apresentação formal e mais aprofundada dos conceitos sobre esta ferramenta por meio de diferentes pontos de vista.

Funções *wavelets*

O funcionamento da TW está centrado na utilização de pequenas formas de ondas (funções) que são localizadas no tempo. Estas funções são manipuladas através de processos de translações (movimentos sobre o sinal em análise) e de dilatações, ou contrações. Por estas manipulações transforma-se um sinal de entrada em uma outra forma de onda, com “desdobramentos” no tempo e em escalas (níveis).

Existem várias *wavelets* que podem ser utilizadas para processamento de sinais, todas com o formato de pequenas formas de onda, como ilustra a Figura 2.7. A escolha da melhor *wavelet* a ser utilizada em uma determinada aplicação depende, tanto da natureza do sinal, quanto dos requisitos de análises que se pretende realizar (Addison, 2002).

Nesse sentido, as funções *wavelets* $\psi(t)$ têm que satisfazer certas condições matemáticas para que possam originar uma família de *wavelets*:

Figura 2.7: Formas básicas de algumas funções *wavelets* que são dilatadas e transladadas para serem utilizadas na TW. Adaptado de: Addison (2002).

1. A *wavelet* tem que ser absolutamente integrável:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) dt < \infty. \quad (2.4)$$

2. Tem que ter energia finita, a ser preservada pela análise:

$$E = \int_{-\infty}^{+\infty} |\psi(t)|^2 dt < \infty. \quad (2.5)$$

Na prática, as funções *wavelets* são normalizadas para que sua energia seja unitária (Addison, 2002).

3. A condição de admissibilidade, dada pela Equação (2.6), deve ser respeitada:

$$C_g = \int_0^{\infty} \frac{|\psi(F)|^2}{f} df < \infty, \quad (2.6)$$

onde $\psi(F)$ é a Transformada de *Fourier* de $\psi(t)$.

4. As *wavelets* complexas não possuem componentes de frequência negativa. Vale ressaltar

que as famílias *wavelets* utilizadas na implementação deste trabalho são complexas, logo, não possuirão componentes de frequência negativas.

A Transformada *Wavelet* Contínua

Uma *wavelet* mãe é utilizada para análise de sinais por meio de dois procedimentos: o procedimento de dilatação (contraindo ou dilatando a forma de onda) e o de translação. As dilatações e contrações da *wavelet* são controladas pelo parâmetro a . Já para movimentar a *wavelet* ao longo do sinal em análise (translação) é utilizado o parâmetro b . Assim, a função $\psi(t)$ pode ser escrita, em termos de a e de b , da forma como é apresentada na Equação (2.7). Verificando a Equação (2.7), percebe-se que a *wave* mãe original tem $a = 1$ e $b = 0$.

$$\psi\left(\frac{t-b}{a}\right). \quad (2.7)$$

Na Figura 2.8, exemplifica-se o procedimento de dilatação aplicado às funções *wave* Gaussiana e *Mexican Hat*. Nesta figura os valores do parâmetro a obedecem às seguintes relações: $a_1 = a_2/2$ e $a_3 = 2 * a_2$.

Figura 2.8: Dilatação de uma *wavelet*.

A Figura 2.9 exemplifica o processo de translação para as funções *wave* Gaussiana e *Mexican Hat*, respectivamente, adotandose as seguintes relações para o valor de b : $b_2 = b_1 * 2$ e $b_3 = b_1 * 4$.

A definição da Transformada *Wavelet* Contínua (TWC) de um sinal, para uma faixa de valores de a e de b , pode então ser representada pela Equação (2.8):

$$D(A, B) = w(a) \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt, \quad (2.8)$$

Figura 2.9: Translação de uma *wavelet*.

onde $w(a)$ é uma função geralmente definida como $\frac{1}{\sqrt{a}}$, em razão da conservação da energia do sinal (Addison, 2002).

Portanto, a TWC é a correlação do sinal de entrada com um conjunto de *wavelets* de várias larguras (dilatadas ou contraídas) transladadas ao longo do sinal.

Assim como a TF, a TW tem a sua inversa, que está definida na Equação (2.9). O sinal original é, então, reconstruído a partir de sua transformada pela integração desta, para todos os valores de escala e localização (parâmetros a e b respectivamente).

$$x(t) = \frac{1}{C_g} \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} D(a, b) \psi_{a,b}(t) \frac{da db}{a^2}. \quad (2.9)$$

A Transformada Wavelet Discreta

Anteriormente, a função *Wavelet* foi definida em termos dos parâmetros de escala e de dilatação, na Equação (2.7). Entretanto, na prática, os valores destes parâmetros são discretizados como ilustra a Equação (2.10):

$$\psi_{m,n}(t) = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \psi\left(\frac{t - nb_0 a_0^m}{a_0^m}\right). \quad (2.10)$$

Na Equação (2.10), os parâmetros m e n são inteiros que controlam a dilatação e translação, respectivamente. A constante a_0 é um passo fixo de dilatação, e seu valor geralmente é maior que 1. Já b_0 é o parâmetro de localização, e seu valor deve ser maior do que 0. Uma escolha comum, de acordo com Addison (2002), para os parâmetros a e b é 2 e 1, respectivamente. Esta escolha coloca os passos de dilatação e translação em uma escala logarítmica de potência de 2

(*dyadic grid*). O passo da dilatação (Δb) é diretamente proporcional ao fator de escala a_0^m , sendo dado por $\Delta b = b_0 a_0^m$.

Define-se então, a TW de um sinal contínuo no tempo, $x(t)$, usando valores discretizados das *Wavelets* de acordo com a Equação (2.11).

$$D_{m,n} = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \frac{1}{\sqrt{a_0^{m/2}}} \psi \left(\frac{a_0^{-m} t - n b_0}{a} \right) dt, \quad (2.11)$$

ou, na forma compacta, como:

$$D_{m,n} = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi_{m,n}(t) dt. \quad (2.12)$$

Uma outra possibilidade, é definir a TWD na forma de produto interno, como na Equação (2.13).

$$D_{m,n} = \langle x, \psi_{m,n} \rangle. \quad (2.13)$$

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 à funções conhecidas como escalas, dadas pela Equação (2.14). A função escala fornece uma versão suavizada do sinal original, sendo referenciada na literatura como *wavelet* pai. A convolução da função escala com um sinal produz os coeficientes de aproximação (A) da TWD, conforme a Equação (2.15).

$$\phi_{m,n}(t) = 2^{-m/2} \phi(2^{-m} t - n), \quad (2.14)$$

$$A_{m,n} = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \phi_{m,n}(t) dt. \quad (2.15)$$

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

$$x_m(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_{m,n} \phi_{m,n}(t), \quad (2.16)$$

$$d_m(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} D_{m,n} \psi_{m,n}(t), \quad (2.17)$$

$$x(t) = x_{m_0}(t) + \sum_{m=-\infty}^{m_0} d_m(t), \quad (2.18)$$

onde $x_m(t)$, apresentado na Equação (2.16), é uma versão suavizada do sinal original reconstruído a partir de sua aproximação de nível m . Já $d_m(t)$, exposto na Equação (2.17), é a aplicação da TWD inversa ao detalhe de nível m .

Pela Equação (2.18) percebe-se que o sinal original é reconstruído por sua aproximação de nível m_0 , adicionado aos sucessivos detalhes. A obtenção de níveis sucessivos de aproximação e detalhes do sinal original consiste no algoritmo de Análise Multiresolução (AMR) (Addison, 2002). Ainda a partir da Equação (2.18), conclui-se que adicionando-se o detalhe de nível m de um sinal a sua aproximação de mesmo nível, tem-se como resultado a aproximação do sinal em um nível acima, ou seja, com o índice de escala decrescido de uma unidade:

$$x_{m-1}(t) = x_m(t) + d_m(t). \quad (2.19)$$

A interpretação do resultado da aplicação das funções ϕ e ψ em um sinal de entrada leva a conclusão de que estas funções representam um filtro passa-altas e um passa-baixas, respectivamente (Addison, 2002).

Outra observação pertinente a se fazer é que, na prática, os sinais de entrada $x(t)$ para as funções ϕ e ψ , são sinais discretizados no tempo. Assim, o comprimento N do 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 $0 < m < M$.

Implementação da Transformada *Wavelet* Discreta por Banco de Filtros

A TW é uma técnica que recentemente vem sendo bastante utilizada em SEPs, pois com esta ferramenta é possível precisamente detectar o início de uma descontinuidade no sinal quando existente, referenciando-o ao domínio do tempo, além de possibilitar uma boa extração das características do mesmo. A aplicação da TW em SEP é 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) por 2 (Jemse e Harb, 2000).

A Figura 2.10 ilustra vários níveis de decomposição de um sinal pelo emprego da TWD. Como mostra a figura, um sinal é filtrado por um filtro passa-baixas (h) e por um filtro passa-altas (g), e então é aplicado o operador *downsampling* na saída de cada filtro. A saída do filtro passa-baixas representa a aproximação do sinal. Já a resposta do filtro passa-altas fornece o detalhe do sinal original. Este processo pode ser sucessivamente aplicado às aproximações para a obtenção da decomposição em diferentes níveis, sendo que em cada nível a faixa de frequência é dividida ao meio após a passagem do sinal pelos filtros. A obtenção destes sucessivos níveis de decomposição do sinal resulta no processo referenciado como AMR.

Cabe frisar que o filtro passa-baixa sempre fornecerá a aproximação do sinal, pois desempenha o papel da função ϕ , enquanto que o filtro passa-alta tem a mesma função de ψ , portanto, fornecerá o detalhe do sinal original. O sinal resultante da filtragem é dado pela concatenação da aproximação com os detalhes, assim como visto anteriormente.

Figura 2.10: A decomposição de um sinal pela TW.

Como anteriormente apresentado, a TWD de um sinal não é única, uma vez que depende do filtro passa-baixa e do filtro passa-alta utilizados. Sendo assim, um parâmetro chave para

trabalhar com a TW é a escolha da *wavelet* mãe que será empregada. A literatura aponta, por exemplo, que a família *Daubechies* geralmente é uma boa escolha para a maioria das situações presenciadas em um SEP, pois, geralmente, melhor identificam os fenômenos com decaimentos e oscilações rápidas, além de transitórios, características típicas destes eventos (Baran e Kim, 2006). Verifica-se também que *wavelets* com suporte menor (filtros com poucos coeficientes) são ideais para localizar fenômenos no tempo. Já fenômenos com variações mais lentas, como afundamentos e elevações de tensão, podem ser melhor identificados por *wavelets* com maior quantidade de coeficientes.

A Transformada Wavelet Packet

A 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 (Jemse e Harb, 2000), como pode ser visualizado na Figura 2.11. Tal abordagem resulta em uma melhor resolução no domínio da frequência, possibilitando uma melhor extração das características desejadas nesta aplicação, sendo por este motivo adotada neste trabalho. A Tabela 2.1 exemplifica como ocorre a divisão de frequência quando da aplicação da TWP.

Figura 2.11: Árvore de coeficientes quando da aplicação da TWP até o terceiro nível.

As referências Barros e Diego (2006) e Hamid *et al.* (2001) mostram como utilizar a energia das amostras de cada uma das faixas de frequência para se obter os valores dos harmônicos presentes em um sinal. Um procedimento semelhante ao adotado pelas referências citadas foi adotado para a estimação dos harmônicos presentes nos sinais durante os eventos transitórios

Tabela 2.1: Faixas de frequência da aplicação da TWP ilustrada na Figura 2.11.

Folha	Nº 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	$f/4 \sim 2f/4$
$A_{2,2}$	N/4	$2f/4 \sim 3f/4$
$D_{2,2}$	N/4	$3f/4 \sim f$
$A_{1,3}$	N/8	$0 \sim f/8$
$D_{1,3}$	N/8	$f/8 \sim 2f/8$
$A_{2,3}$	N/8	$2f/8 \sim 3f/8$
$D_{2,3}$	N/8	$3f/8 \sim 4f/8$
$A_{3,3}$	N/8	$4f/8 \sim 5f/8$
$D_{3,3}$	N/8	$5f/8 \sim 6f/8$
$A_{4,3}$	N/8	$6f/8 \sim 7f/8$
$D_{4,3}$	N/8	$7f/8 \sim f$

aos quais um transformador pode estar submetido.

2.3.2 Conceitos sobre a Lógica *fuzzy*

Muitos dos problemas da engenharia, para serem resolvidos computacionalmente, necessitam contar com a experiência humana. Portanto, o sistema que resolverá o problema tem que processar informações de forma semelhante aos humanos. As pessoas são capazes de lidar com processos bastante complexos, baseados em informações imprecisas ou aproximadas, e a estratégia de decisão adotada por elas é, também, de natureza imprecisa (Zimmermann, 2001). Por isto, a tomada de decisão, por parte dos humanos, nem sempre, se resume a um “sim” ou “não”, a “verdadeiro” ou “falso”, ou a “pertence” ou “não pertence”, tão pouco pode ser expressa por uma exatidão numérica. De acordo com Fialho (2007) o raciocínio humano conduz a uma classificação, ou agregação qualitativa em categorias gerais ou conjuntos possíveis de soluções, que podem ser expressas em termos lingüísticos.

É neste contexto que se insere a teoria dos conjuntos *fuzzy* (ou nebulosos) proposta por Zadeh (1965), possibilitando o tratamento de informações de caráter impreciso ou vago a sistemas de computadores. A computação nebulosa permite a tomada de decisão, e em consequência a solução do problema, baseada em valores qualitativos e na manipulação de variáveis lingüísticas através de regras que descrevem o desejado.

Nesta seção serão apresentados alguns conceitos básicos sobre os conjuntos *fuzzy*, o proce-

dimento de inferência *fuzzy* e sobre a estrutura de um sistema *fuzzy*.

Conjuntos *Fuzzy*

A lógica clássica está definida sobre a concepção fundamentada dos conjuntos. De acordo com esta concepção, um certo valor pode pertencer ou não a um determinado conjunto. Então, dado um conjunto A , definido em um universo X , os elementos deste universo pertencem ou não pertencem a A . Esta relação pode ser mapeada pela função característica (ou de inclusão) $\mu_A(x)$:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1, & \text{se } x \in A \\ 0, & \text{se } x \notin A \end{cases} \quad (2.20)$$

No caso da LF, um valor qualquer pode pertencer a um conjunto, com um certo grau de pertinência. Esta idéia flexibiliza a função característica, de modo que ela pode assumir um número infinito de valores no intervalo $[0, 1]$. A função de pertinência de um conjunto nebuloso A é representada por:

$$\mu_A(x) : X \rightarrow [0; 1]; x \in X, \quad (2.21)$$

onde $\mu_A(x)$ expressa o grau com que o elemento x , pertencente ao universo de discurso X , está inserido no conjunto *fuzzy* A .

A forma de se representar um conjunto *fuzzy* depende, basicamente, da natureza e da dimensão do universo de discurso ao qual seus elementos pertencem. Se o universo X for discreto e finito, o conjunto *fuzzy* A pode ser representado por um vetor contendo os graus de pertinência no conjunto A dos elementos correspondentes de X , ou ainda, por meio da seguinte notação (que não deve ser confundida com a soma algébrica, pois $\sum$, nesse caso, significa a coleção de todos os pontos (Mendel, 1995)):

$$A = \sum_{i=1}^N \mu_A(x_i)/x_i, \quad (2.22)$$

onde cada termo $\mu_A(x_i)/x_i$ fornece o grau de pertinência do elemento x_i em relação ao conjunto *fuzzy* A .

Se o universo de discurso, X , for contínuo, emprega-se a seguinte notação:

$$A = \int_{i=1}^N \mu_A(x_i)/x_i, \quad (2.23)$$

onde $\int$ tem o mesmo significado do $\sum$ da Equação (2.22).

As funções de pertinência de um conjunto *fuzzy* podem ser de diversos tipos ou formatos. A escolha do formato ideal da função de pertinência, nem sempre é uma tarefa fácil, sendo que um especialista deve determinar o melhor formado para cada aplicação. Os formatos de funções de pertinência mais utilizados são: Triangular, Trapezoidal e Gaussiana, ilustrados nas Figuras 2.12(a), 2.12(b) e 2.12(c), respectivamente.

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & \text{se } x \leq a \\ \frac{x-a}{m-a}, & \text{se } x \in [a, m] \\ \frac{b-x}{b-m}, & \text{se } x \in [m, b] \\ 0, & \text{se } x \geq b \end{cases}$$

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & \text{se } x \leq a \\ \frac{x-a}{m-a}, & \text{se } x \in [a, m] \\ 1, & \text{se } x \in [m, n] \\ \frac{b-x}{b-n}, & \text{se } x \in [n, b] \\ 0, & \text{se } x \geq b \end{cases}$$

$$\mu(x) = \exp^{-\sigma(x-m)^2}$$

Figura 2.12: Tipos de funções de pertinência *fuzzy*.

A seguir, enumera-se algumas importantes definições sobre conjuntos *fuzzy*:

1. Conjunto *fuzzy* normalizado: um conjunto *fuzzy* é normalizado se, pelo menos um de seus elementos, possuir grau de pertinência igual a 1;

2. Suporte de um conjunto *fuzzy*: conjunto de pontos do universo de discurso, para os quais $\mu_A(x)$ possui valor positivo;
3. *Singleton*: um conjunto *fuzzy* normalizado, cujo suporte é um único ponto.

Operações sobre Conjuntos *Fuzzy*

Os operadores básicos que se aplicam aos conjuntos nebulosos são extensões dos operadores utilizados em conjuntos tradicionais. Os principais operadores aplicados em conjuntos *fuzzy* são: união, intersecção e complemento.

A referência Zimmermann (2001) apresenta os operadores matemáticos *T-norma* e *S-norma*, a partir dos quais são definidos os operadores de intersecção e união, respectivamente. Para um operador ser considerado como um operador de intersecção, ele deve ser considerado como um *T-norma*. Por sua vez, para ser considerado como um operador de união, um certo operador deve ser um *S-norma*.

Existem vários exemplos de operadores que são considerados *T-normas* e, por isto, podem ser utilizados para realizar a intersecção. Entretanto, o operador *T-norma* mais utilizado é o mínimo. Fazendo a intersecção com o operador de mínimo (“Min”), tem-se $\mu_{A \cap B}(x_i) = \text{Min}[\mu_A(x_i), \mu_B(x_i)]$. Um *T-norma* deve satisfazer as seguintes propriedades:

1. Contorno: $T(0, 0) = 0$ e $T(\mu_A(x), 1) = \mu_A(x)$;
2. Comutativa: $T(\mu_A(x), \mu_B(x)) = T(\mu_B(x), \mu_A(x))$;
3. Associativa: $T(\mu_A(x), T(\mu_B(x), \mu_C(x))) = T(T(\mu_A(x), \mu_B(x)), \mu_C(x))$;
4. Monotonicidade: $T(\mu_A(x), \mu_B(x)) \leq T(\mu_C(x), \mu_D(x))$ se $\mu_A(x) \leq \mu_C(x)$ e $\mu_B(x) \leq \mu_D(x)$.

Já o principal operador de união é o máximo (“Max”), resultando em $\mu_{A \cup B}(x_i) = \text{Max}[\mu_A(x_i), \mu_B(x_i)]$. Contudo, existem outros operadores que também são considerados *S-normas*, e podem ser utilizados para união. Um *S-norma* deve obedecer às seguintes propriedades:

1. Contorno: $S(1, 1) = 1$ e $S(\mu_A(x), 0) = \mu_A(x)$;
2. Comutativa: $S(\mu_A(x), \mu_B(x)) = S(\mu_B(x), \mu_A(x))$;
3. Associativa: $S(\mu_A(x), S(\mu_B(x), \mu_C(x))) = S(S(\mu_A(x), \mu_B(x)), \mu_C(x))$;

4. Monotonicidade: $S(\mu_A(x), \mu_B(x)) \leq S(\mu_C(x), \mu_D(x))$ se $\mu_A(x) \leq \mu_C(x)$ e $\mu_B(x) \leq \mu_D(x)$.

A outra operação básica citada é o complemento. O complemento $\bar{A}$ de A é definido por $\mu_{\bar{A}}(x_i) = 1 - \mu_A(x_i)$. Além destas, existem várias outras operações definidas para conjuntos *fuzzy*, como por exemplo a normalização. Outras operações aplicáveis a conjuntos *fuzzy* podem ser encontradas e melhor explicadas por Zimmermann (2001).

Variáveis Lingüísticas e Inferência *Fuzzy*

Segundo Zimmermann (2001), os sistemas de inferência *fuzzy* permitem o tratamento e manipulação de informações incertas e imprecisas, as quais são representadas por uma família de conjuntos *fuzzy*. Tais sistemas de inferência permitem a modelagem de processos que tem suas informações fornecidas de forma qualitativa. O mecanismo de inferência *fuzzy* é composto por variáveis lingüísticas que se associam por meio de conectivos para formar regras. Cada regra implica em uma variável de saída *fuzzy*, que também é uma variável lingüística. Por fim as saídas *fuzzy* de cada regra precisam ser combinadas, de modo que, ao final do processo de inferência, seja fornecida apenas uma saída *fuzzy*.

Uma variável lingüística tem a capacidade de classificar de modo impreciso uma informação, em termos de conceitos qualitativos, no lugar de quantitativos. Tais variáveis são compostas por vários termos lingüísticos, que as caracterizam, com cada termo sendo representado por um conjunto *fuzzy*. Uma variável lingüística pode ser caracterizada pelos seguintes atributos: nome (x); conjunto de termos (nomes) $T(x)$ associados aos valores lingüísticos da variável lingüística; pelo universo de discurso $U(x)$ de definição da variável lingüística e por suas funções de pertinência $\mu(x)$ que representam cada termo lingüístico. A Figura 2.13 exemplifica uma variável lingüística e seus atributos, onde $x = \{ \% \text{ de Segundo Harmônico } (\%2H.) \}$; $T(\%2H.) = \{MB, BA, ME, AL, MA\}$; $U(\%2H.) = [0, 50]$ e funções de pertinência $\mu(x)$ representadas pelos conjuntos *fuzzy* retangulares ($\mu_{MB}(\%2H.)$ e $\mu_{MA}(\%2H.)$) e triangulares ($\mu_{BA}(\%2H.)$, $\mu_{ME}(\%2H.)$ e $\mu_{AL}(\%2H.)$) ilustrados na figura.

As principais operações realizadas com variáveis lingüísticas são feitas por meio dos conectivos “E”, “OU” e “NÃO”. Tais conectivos são utilizados para compor os relacionamentos lógicos entre os termos das variáveis lingüísticas, ou seja, são utilizados nas regras de inferência. Os termos “E” e “OU” são definidos por operadores de intersecção (T-norma) e união (S-norma), respectivamente. Como comentado anteriormente, os principais operadores de in-

Figura 2.13: Exemplo de uma variável linguística e seus atributos.

tersecção e união são o mínimo (“Min”) e o máximo (“Max”). Já o operador de negação “NÃO”, é implementado pela operação de complemento, apresentada na seção anterior.

As regras de inferência são do tipo “SE <condição> ENTÃO <ação>”, onde <condição> são os antecedentes e <ação> são os conseqüentes. Na inferência *fuzzy* tanto os antecedentes quanto os conseqüentes são variáveis linguísticas. Um exemplo de regra de inferência *fuzzy* seria: “SE < Corrente Diferencial é Alta E Segundo Harmônico é Alto > ENTÃO < Evento é Energização>”.

Para tornar possível o processo de inferência, é necessária a definição da operação *fuzzy* de implicação (“ENTÃO”). Esse operador define a implicação de cada regra linguística sobre uma dada variável linguística de saída. Em outras palavras, ele relaciona o termo antecedente com o conseqüente. Zimmermann (2001) cita a existência de vários operadores de implicação, todos definidos em termos das relações de “Max” e “Min”. Entretanto, o operador de implicação mais utilizado é o de *Mandani*, definido pela operação de “Min” e também conhecido como mínimo de *Mandani*.

Um SF, geralmente, é composto por várias regras de inferência. Então, é necessária a existência de uma operação que combine as saídas de cada regra, de forma a se obter uma saída única. O operador de agregação é o responsável por unir as influências de todas as regras, após a aplicação dos operadores de implicação, apresentando a conseqüência (resultado) do sistema como um todo. A agregação é o último passo do processo de inferência e pode ser realizada por uma *T-norma* ou por uma *S-norma*. Geralmente, o operador mais utilizado para a agregação é o operador de máximo.

Percebe-se a preferência, na maioria das vezes, pela utilização das funções de mínimo e de máximo para a definição das operações *fuzzy*. Tal fato ocorre em virtude da rapidez e da simplicidade de implementação computacional destas funções.

Estrutura de um Sistema *Fuzzy*

Este tópico tem por objetivo ilustrar a organização dos módulos que compõe um SF, além de mostrar o sentido do fluxo da informação, desde a entrada dos dados no sistema até a tomada e decisão. A Figura 2.14 apresenta os blocos que constituem um SF, e a seguir, as funções de cada bloco serão explicadas.

Figura 2.14: Estrutura de blocos dos módulos de um SF.

A interface de *fuzzyficação* é a parte do sistema *fuzzy* responsável por receber as entradas “Crisp” dos atuadores e convertê-las em variáveis lingüísticas. A interface de *fuzzyficação* desempenha sua tarefa transformando cada entrada em um *Singleton*. Para transformar as entradas em *Singletons*, a interface de *fuzzyficação* faz 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 - que contém as regras sobre o comportamento do sistema. Os passos do procedimento de inferência são: encontrar as regras ativadas pelas variáveis de entrada; determinar a respectiva saída de cada regra e combinar todas as saídas para formar a região *fuzzy* de saída.

Por fim, a interface de *defuzzyficação* transforma a região *fuzzy* de saída em uma resposta não *fuzzy*, pertencente ao universo de discurso "*Crisp*" original. Tal procedimento se faz necessário porque em, aplicações práticas, geralmente são requeridas saídas precisas. Os principais métodos de *defuzzyficação* são: o centro de área; a média dos máximos; o do primeiro máximo e o do último máximo. Dentre estes métodos o mais utilizado é o de centro de área.

Pelo apresentado, fica claro que a principal vantagem de um SF consiste na possibilidade de representar o conhecimento de um especialista em termos de variáveis e de regras lingüísticas. Tal vantagem possibilita uma maior robustez ao sistema de decisão, o deixa com uma maior tolerância à falhas e permite manipular informações com imprecisão e incertezas. Estas características são bastante estimulantes para a utilização de SF em SEP, uma vez que as grandezas observadas pelos transdutores contém um certo grau de incerteza. Além disto, os equipamentos transdutores também são susceptíveis à falhas que podem ocasionar erros nas medições.

2.4 Publicações Pertinentes ao Tema Proposto

A partir destas informações e conceitos iniciais, como parte do conteúdo deste capítulo, será apresentado um breve levantamento bibliográfico, com alguns dos trabalhos recentemente desenvolvidos sobre a temática proposta nesta pesquisa, empregando principalmente a TW e a LF.

Em Wiszniewski e Kasztenny (1995), foi apresentado um método de proteção de transformadores que tem por base a utilização de um algoritmo de múltiplos critérios baseado na LF. Para a tomada da decisão de operação (*TRIP*) o algoritmo leva em conta três critérios: a detecção da falta interna; a ponderação dos custos pela operação errônea do relé, ou seja, de uma não atuação, e se a quantidade de incerteza para a tomada da decisão é relativamente aceitável.

Os autores Chuanli, Yizhuang, Xiaoxu, Wenzhe, e GuoXing (Chuanli *et al.*), propõem um algoritmo para a diferenciação entre correntes de falta interna e correntes de energização de transformadores. Tal algoritmo tem por base a TW. De acordo com a lógica proposta, em caso

da ocorrência de uma corrente diferencial superior aos patamares pré-estabelecidos, a forma de onda será processada pela TW. É calculada a energia do sinal após o processamento e esta é dividida pela energia presente na forma de onda do sinal original. Caso o resultado desta divisão seja maior que um valor pré-determinado, a corrente diferencial analisada diz respeito a uma corrente de energização, em caso contrário, estará representando uma falta interna ao elemento protegido.

No trabalho exposto por Mao e Aggarwal (2000), relata-se a utilização da TW para a distinção entre corrente de energização e corrente de falta interna de um transformador. Ao ser detectada a existência de uma corrente diferencial no transformador em uma dada janela de dados, é realizada a TWD desta janela de dados. Para a diferenciação dentre os eventos analisados, é utilizado o detalhe de primeiro nível, observando-se a relação entre o maior valor da primeira janela após a detecção da corrente diferencial com o maior valor em cada uma das janelas seguintes. Caso, em pelo menos uma das fases da corrente, essa relação seja maior que um valor pré-determinado, a corrente diferencial observada refere-se a uma corrente de energização. Caso contrário, refere-se a uma falta interna. O método proposto neste trabalho foi testado em dois sistemas elétricos diferentes e, em cada um dos sistemas, foram gerados 220 distintos casos (envolvendo situações de energização e faltas internas), obtendo-se 100% de acerto para ambas as situações.

Em Mao e Aggarwal (2001) os autores propõem um método para a diferenciação das seguintes situações: falta interna, falta externa com saturação de TC e energização do transformador. Os autores utilizaram a TW *Daubechies 4* para tratar os sinais, evidenciando-se o comportamento dos detalhes dos três primeiros níveis dos sinais filtrados para as três situações estudadas. Para a distinção dentre as situações estudadas, decidiu-se pela utilização da energia dos detalhes dos níveis 1, 2 e 3 das formas de onda originais. Essas energias foram consideradas como entrada de uma RNAs. A RNAs empregada foi uma *Multi-Layer Perceptron* (MLP) com vinte e sete entradas, função de ativação tangente hiperbólica e treinamento *back-propagation*. Esta configuração de rede apresentou um excelente desempenho, atingindo 99% de acerto sobre as situações avaliadas.

Eldin (2003), apresenta uma técnica que combina a TW com LF para diferenciar dentre faltas internas, faltas externas com saturação de TC e correntes de energização. Inicialmente é calculada a corrente diferencial nas três fases, e caso algumas das fases ultrapasse um limiar pré-estabelecido, a lógica de diferenciação entre os fenômenos é ativada. Para identificar o que

causou a corrente diferencial, é utilizada a TW *Daubechies 4* para obter o detalhe de primeiro nível, de onde são extraídos os valores máximos de cada fase para a janela de dados atual. Posteriormente é calculada uma média entre os valores máximos da janela atual e os da janela anterior. Também calcula-se o valor da energia deste detalhe de primeiro nível. A média dos valores máximos e a energia dos detalhes das três fases são então fornecidas como entradas ao SF. O SF utilizado é o de Sugeno, sendo que os parâmetros das regras são ajustados pelo método *back-propagation*.

Os autores Shin *et al.* (2003) apontam que a utilização da componente de segunda harmônica tornou-se insuficiente para caracterizar determinadas situações de operação do transformador. Isso ocorre devido à melhora obtida com os novos materiais utilizados na confecção do núcleo magnético destes equipamentos. Esta melhora apontada diminuiu a quantidade de segundo harmônico injetada no sistema frente às diversas situações ao qual o transformador é submetido. Desta forma, os autores propõem um algoritmo baseado em LF para caracterizar a condição de operação do transformador. As três entradas do SF proposto são obtidas da relação entre as componentes de primeiro e segundo harmônico; da relação entre a corrente diferencial e a corrente de restrição; e com a utilização do fluxo magnético proporcionado pelas correntes diferenciais. Os resultados mostram uma alta eficiência do algoritmo frente as várias situações simuladas, inclusive para os casos de energizações com baixa presença de segunda harmônica.

O trabalho de Khorashadi-Zadeh e Sanaye-Pasand (2004) propõe um esquema de proteção para o transformador de potência que usa TW e RNAs para distinguir entre situações faltosas ou não. Neste trabalho foram caracterizadas situações de corrente de energização, sobreexcitação e de faltas internas. Os autores mostram que a TW fornece uma representação eficaz do sinal para os diferentes casos, facilitando a classificação via RNAs. Conforme relatam os autores, a combinação da TW com RNAs consegue um ótimo desempenho distinguindo, rapidamente e com precisão, dentre situações de faltas internas das demais situações.

Em Saleh e Rahman (2005), foi proposta a utilização da TWP para a formulação de um método moderno para proteção de transformadores capaz de distinguir entre corrente de energização, diferentes tipos de faltas internas e regime normal de operação. Para distinguir dentre os fenômenos citados, utiliza-se do detalhe de segundo nível da sub-banda de maior frequência, comparando-se seus valores a zero. Caso o módulo do valor de um dos coeficientes seja maior que zero, caracteriza-se uma situação de falta interna. A técnica obteve êxito para os casos testados, com uma resposta correta dentro de um quarto de ciclo após o início do

evento de sobrecorrente. Resultado este bastante animador quando comparado com os testes realizados com a utilização de técnicas baseadas na restrição harmônica pelo uso da TF, uma vez que esta técnica apresentou a resposta ao evento somente após um ciclo do início do fenômeno analisado.

A técnica utilizada em Jiping *et al.* (2005) para a detecção e distinção dentre os distúrbios observados em transformadores de potência também se baseia na aplicação da TW. Os autores propõem a utilização da *wavet* mãe *Daubechies* para processar os sinais de corrente medidos em ambos os lados do transformador. Para detectar uma situação indesejada verifica-se o maior valor, em módulo, do detalhe da janela de dados em análise. Caso este venha a ultrapassar um limiar pré-estabelecido, aponta-se uma anormalidade sobre o sistema. Em caso positivo, verifica-se a posição da ocorrência como sendo externa e/ou interna ao transformador protegido. De acordo com os autores, em caso de falta interna, o máximo valor em módulo do detalhe de ambos os lados do transformador têm a mesma polaridade. Já em caso de uma falta externa, o máximo valor dos detalhes das janelas de dados terão polaridade diferentes para cada lado do transformador. É ressaltado a eficiência do método mesmo em condições em que ocorre a saturação dos TCs, demonstrando uma certa robustez do método proposto.

Os autores Faiz e Lotfi-Fard (2006) propõem em seu trabalho uma nova metodologia para a proteção diferencial de transformadores utilizando coeficientes da TW. Os autores salientam duas principais vantagens do método proposto: a discriminação entre falta interna e corrente de energização em um quarto de ciclo após a ocorrência do distúrbio e a independência de limiares de atuação. Os resultados apresentados mostram velocidade e precisão na detecção e discriminação dos fenômenos considerados.

O trabalho de Baran e Kim (2006) trata da diferenciação entre correntes de energização e correntes de falta observadas em um transformador de uma subestação de distribuição de energia elétrica. Para extrair as características típicas de cada forma de onda, utilizou-se da TF e da TW. Para classificar os dados obtidos foram implementadas duas arquiteturas de RNAs. Uma que dispõe de dados pré-processados pela TF e outra que se utiliza dos dados extraídos pelo emprego da TW. Os testes aplicados às duas arquiteturas apresentaram bons resultados. Contudo, resalta-se que os resultados obtidos da associação de RNAs e TW foram melhores quando comparados aos da RNAs com TF.

Em El Safty *et al.* (2006) os autores explanam uma lógica de proteção de transformadores que utiliza a TW e a LF. Neste trabalho, caso ocorra em uma janela de dados o surgimento de

uma corrente diferencial, inicia-se o processo de classificação do evento. Para tanto, a janela de dados é decomposta até o terceiro nível pela TW. O maior valor absoluto de cada um dos detalhes do sinal transformado é selecionado como entrada do SF. Sendo assim, o SF possui três variáveis de entrada, além de seis regras de inferência e uma variável de saída que aponta o evento presenciado pelo transformador.

Os autores Barbosa *et al.* (2006), propuseram a utilização da LF para a proteção de transformadores e obtiveram resultados bastante animadores com a metodologia por eles adotada. Na técnica proposta, caso ocorra uma corrente diferencial que ultrapasse um patamar pré-estabelecido, a decisão acerca do *TRIP* do relé será tomada por um SF. As entradas deste sistema são: a amplitude da corrente diferencial fundamental; as maiores amplitudes das componentes de segundo, terceiro e quinto harmônico do primário ou do secundário e o fluxo magnético no transformador. De posse destas variáveis de entrada foram confeccionadas dezoito regras de inferência, sendo que a saída do sistema indicará a atuação ou não do dispositivo de proteção. Segundo os autores o sistema veio a responder corretamente para as várias situações às quais foi submetido.

Delshad e Fani (2007), apresentam um algoritmo de proteção de transformadores que utiliza um SF para indicar se uma determinada corrente diferencial que venha surgir é consequência de uma falta interna ou da energização do transformador. Tal SF recebe duas variáveis como entradas. A primeira entrada é dada pela relação entre a componente de segundo harmônico e a componente de primeiro harmônico. Já a segunda entrada é dada pela defasagem entre a componente de segundo harmônico e a componente fundamental durante a situação observada. Os autores comentam que durante uma situação faltosa tal defasagem fica por volta de 180 ou de 360 graus. Já durante uma situação de energização a defasagem é em torno de 90 ou 270 graus.

A Identificação das correntes de energização nos transformadores é um problema importante para a proteção de outros elementos do SEP, como pode ser evidenciado em Youssef (2003). Neste trabalho foi descrito uma metodologia que dispõem da TW para discernir entre correntes de energização de transformadores das de faltas na linha de transmissão (externas ao transformador). De acordo com o explanado, sempre que existir altas frequências no sinal analisado, estas estarão evidenciadas no detalhe de primeiro nível. O autor também comenta que a maior parte da energia das várias situações analisadas se concentra na aproximação de quarto nível. Para diferenciar entre uma situação de falta externa de uma situação de energização, conta-se

a quantidade de amostras entre dois picos e vales sucessivos da aproximação de quarto nível, sendo que há uma quantidade de amostras pré-determinada para indicar energização e outra para falta. A técnica se mostrou eficiente para todos os casos testados.

Mais um método direcionado à proteção de linhas de transmissão com o objetivo em discernir dentre a ocorrência de uma falta na linha das de energização de transformadores é apresentado em Youssef (2004). Este método utiliza a TW para pré-processar os dados de entrada do algoritmo e um SF classifica o ocorrido em uma das seguintes categorias: em falta (indicando o tipo de falta), energização do transformador e/ou regime. O SF possui três variáveis de entrada, onze regras e uma variável de saída que aponta a situação observada pelo sistema de proteção. A abordagem proposta neste trabalho se mostrou bastante eficiente, acertando a classificação de todos os casos de testes ao qual foi submetida.

Para discernir dentre os vários eventos associados a um transformador, um ponto importante é a análise das componentes harmônicas presentes em uma determinada situação ao qual o mesmo está submetido. Desta forma, apresenta-se a seguir, dois trabalhos (Hamid *et al.*, 2001; Barros e Diego, 2006) que empregam a TW para a estimação de harmônicos, indicando a possibilidade da utilização desta ferramenta em substituição a usual TF.

No trabalho de Hamid *et al.* (2001), descreve-se uma técnica que dispõe da TWP para o cálculo dos valores eficazes, *Root Mean Square* (RMS), da tensão, corrente e potência. Os autores propõem a decomposição do sinal até o segundo nível. Conforme o relato, neste nível é possível identificar a componente fundamental do sinal em análise e a contribuição dos componentes harmônicos ímpares presentes. Os autores mostraram que as respostas obtidas com a utilização deste método são bem próximas aos valores verdadeiros presentes no sinal, indicando a possibilidade da utilização deste método para obtenção dos componentes harmônicos, quando for conveniente.

Em Barros e Diego (2006), os autores propõem um método para estimação dos grupos harmônicos através da TW e comparam os resultados obtidos com os encontrados pela TF de acordo com o estipulado pelo padrão da *International Electrotechnical Commission* (IEC) para a medição de harmônicos no sistema elétrico. Para a obtenção dos grupos harmônicos o sinal é decomposto até que as frequências desejadas se encontrem no centro das faixas de frequência de saída do filtro. Realiza-se então o cálculo do valor RMS de cada harmônico, dado pela raiz média quadrática dos coeficientes das duas sub-bandas incluídas em cada faixa. Os autores comentam que a literatura aponta as *wavelets* *Vaidyanathan 24*, *Daubechies 20*, e *Coiflet 5* como

as mais adequadas para analisar harmônicos. Neste trabalho foi utilizada a *Vaidyanathan* de 24 coeficientes, sendo os resultados obtidos bem próximos aos encontrados com a utilização da TF para harmônicos, e, melhor ainda, para inter-harmônicos. Esta técnica mostrou-se satisfatória para a estimação de harmônicos, principalmente se utilizada em um projeto que já contempla a utilização da TW para algum outro propósito.

Pelo que já foi apresentado, vale lembrar que em uma etapa futura desta pesquisa, pretende-se dar continuidade aos estudos sobre os distúrbios associados à QEE e suas relações com os eventos relacionados à proteção do transformador. Tendo em vista essa possibilidade, apresenta-se no que segue um breve estudo bibliográfico sobre a classificação dos fenômenos associados à QEE.

Em Kezunovic e Liao (2002) os autores propõem um *software* capaz de detectar e classificar fenômenos relacionados à QEE, bem como um estudo de sensibilidade dos equipamentos conectados. Este último busca detectar e informar o local da ocorrência do fenômeno sobre o sistema. Para detectar e classificar o fenômeno foi utilizado um sistema de tomada de decisão baseado em LF, que é alimentado por características extraídas tanto pela TW quanto pela TF. Após a classificação e o estudo da forma de onda, ativa-se o módulo de estudo de sensibilidade dos equipamentos. Neste módulo é detectado quais as características do distúrbio afetam um determinado equipamento. Por fim, o *software* fornece a localização da ocorrência sobre o sistema em análise.

Os autores Kanitpanyacharoen e Premrudeepreechacharn (2004) apresentam um método de classificação de fenômenos de QEE baseado em TW e em RNAs, capaz de classificar corretamente seis fenômenos de QEE. Os mesmos consideram: transitório impulsivo, interrupção momentânea, afundamento e elevação de tensão, *notching* e distorção harmônica. Na proposta, a extração das características é feita com o uso da curva de desvio padrão do sinal filtrado dispondo da TW, onde a curva do sinal transformado pela TW é subtraída de uma curva originada por uma onda senoidal pura. A diferença entre essas curvas fornece dados a uma RNAs que é responsável pela classificação dos eventos.

Em Negnevitsky e Ringrose (2005), é apresentado um sistema de classificação de distúrbios de QEE baseado em RNAs e LF, que abrange 12 diferentes tipos de distúrbios. Como método de extração das características são utilizadas duas ferramentas: a TW e a TF. Inicialmente, em uma fase de pré-classificação, os distúrbios são divididos entre as classes dos transitórios e de regime permanente. Os distúrbios da primeira classe são submetidos a um método de

classificação e os da segunda a outro. O primeiro método utiliza como ferramenta de extração das características a TW, pois esta ferramenta consegue ressaltar características importantes destes fenômenos. Depois de passar pela TW, os dados são classificados por um sistema Neuro-*fuzzy*. Duas arquiteturas de RNAs foram testadas para o sistema Neuro-*fuzzy*, a MLP e a *Learning Vector Quantization* (LVQ), sendo que a LVQ, na maioria das vezes, obteve melhores resultados. Como cada arquitetura obtém resultados melhores para certos tipos de entrada, os autores propõem que a saída do classificador seja uma junção das saídas das duas arquiteturas, obtendo uma melhora significativa nos resultados. Já para classificar os distúrbios pertencentes a segunda classe, foi proposto um sistema de tomada de decisão simples, alimentado pelos dados provenientes da TF. Os autores comentam que a intenção do método não é a de ser utilizado em tempo real, pois exige um considerável tempo de processamento, e sim em um estudo posterior à ocorrência dos eventos. Os resultados obtidos pelo sistema proposto foram bem satisfatórios para a maioria dos casos analisados.

Na pesquisa realizada em Chacon *et al.* (2007), os autores apresentam uma técnica que se utiliza da TW e da LF para classificar uma série de eventos de QEE. Os autores comparam os resultados obtidos com a aplicação do SF com os obtidos por um classificador *Crisp* implementado com as mesmas variáveis de entrada. Os eventos classificados por ambos os sistemas implementados são: transitórios impulsivos e oscilatórios originários de chaveamentos de bancos de capacitores, afundamento, elevação e interrupção momentânea. Os autores utilizaram a *wavelet* mãe *Daubechies 4* para realizar a AMR e fornecer as características típicas de cada evento. O primeiro nível de detalhe da *Daubechies 4* foi empregado tanto para a detecção do início dos distúrbios quanto para a caracterização dos transitórios oscilatórios. Já o quarto nível de detalhe foi utilizado para fornecer características que possibilitam a distinção dentre os demais fenômenos observados. Outra variável de entrada de ambos os métodos foi obtida via análise de *Fourier*. A última variável de entrada foi obtida com o cálculo do valor RMS do sinal em análise. A classificação por meio do sistema *Crisp* das variáveis observadas obteve 89,77% de acerto. Para a implementação da classificação via sistema *fuzzy*, as variáveis de entrada foram transformadas em variáveis lingüísticas, e as saídas determinadas via regras *fuzzy*, sendo que existem seis possíveis saídas. Uma para cada um dos cinco fenômenos observados e uma para o caso em que não ocorra algum destes eventos. Tal sistema obteve uma taxa de 95% de acerto sobre os casos observados, mostrando uma melhora considerável em relação ao sistema *Crisp*.

Capítulo 3

Simulação Computacional do Sistema Elétrico de Potência

Com o objetivo de testar e validar a técnica de análise proposta frente as condições de operação dos transformadores, realizou-se a simulação de um sistema elétrico, dispondo do *software* ATP. No sistema elétrico simulado foram geradas várias situações de faltas internas, de energizações e de sobreexcitações em um transformador. Estas situações foram utilizadas para testar e validar o algoritmo proposto. Em busca de uma maior semelhança e fidelidade ao procedimento como é realizado na prática em sistema elétricos reais, foram elaboradas rotinas de tratamento dos sinais de corrente obtidos a partir das simulações. No presente trabalho, assumiu-se que os sinais elétricos de corrente provenientes das simulações são fornecidos no domínio analógico, necessitando, portanto, de um condicionamento para serem convertidos ao domínio digital. As rotinas de tratamento dos sinais desenvolvidas compreendem a filtragem do sinal, por meio do filtro de *Butterworth* e a conversão analógico/digital dos valores amostrados. Após a digitalização dos sinais elétricos de corrente, realiza-se um procedimento de correção de defasagem nas formas de onda entre os dois lados do transformador, além da eliminação da componente de sequência zero destes sinais.

Neste capítulo, apresenta-se uma pequena introdução ao *software* de simulação utilizado e, em seguida, o sistema elétrico em análise. Ainda neste capítulo, serão colocadas algumas considerações sobre os procedimentos de pré-processamento aos quais os sinais provenientes das simulações são submetidos.

3.1 Breve Introdução ao ATP

O presente estudo contou com o emprego do *software* ATP na simulação do sistema elétrico analisado. O referido *software* é um dos mais utilizados para a simulação computacional de transitórios eletromagnéticos e eletromecânicos em SEPs (Coury *et al.*, 2007). O ATP, é uma ferramenta de grande flexibilidade e de grande importância no estudo de transitórios ou mesmo de estudos em regime permanente.

Este *software* é originado do *Eletromagnetic Transient Program* (EMTP), desenvolvido a partir da década de 60 por Herman W. Dommel, para a *Bonneville Power Administration*. O ATP surgiu em 1984, após algumas divergências entre Scott Meyer e o grupo de desenvolvimento do EMTP. A partir de então, Meyer iniciou o desenvolvimento do ATP baseado em uma cópia de domínio público do EMTP. O ATP é livre de *royalties*, mas não é de domínio público, de forma que seus pacotes e manuais só podem ser obtidos após assinatura de um contrato entre o usuário e os representantes do grupo de usuários autorizados (ATP, 1987).

O ATP possui muitos modelos de componentes, permitindo a simulação de redes complexas compostas de várias estruturas. Este *software* permite a simulação de distúrbios simétricos ou não simétricos, como por exemplo, descargas atmosféricas, faltas e operações de chaveamento, entre outros. O ATP calcula o valor das variáveis de interesse na simulação do circuito de um SEP (como por exemplo, tensões e correntes) em função do tempo, além de permitir o cálculo da resposta em frequência da rede. Alguns dos componentes passíveis de modelagem pelo emprego do ATP são:

- Elementos R, L, C. Tais elementos podem ser concentrados, não acoplados ou acoplados linearmente. A principal aplicação destes componentes é para formar componentes de filtros, bancos de capacitores, reatores de linha ou equivalentes de redes, entre outros;
- Elementos não-lineares, que podem ser utilizados para representar pára-raios de maneira simplificada ou como complemento para modelagens mais complexas;
- Cabos e linhas de transmissão, com parâmetros distribuídos com ou sem a variação dos parâmetros com a frequência;
- Transformadores, sendo possível a inclusão da saturação e histerese;
- Pára-raios com *gaps* ou do tipo ZnO;

- Chaves simples, estáticas, dependentes do tempo ou da tensão.
- Diodos, tiristores, e *triacs*;
- Máquinas síncronas trifásicas e motores universais;
- Fontes analíticas de tensão ou corrente dos tipos degrau, rampa, senoidal ou exponencial, entre outras. Também é possível a associação de duas ou mais fontes, ou a definição de fontes pelo usuário.

Além destes componentes, o ATP possui módulos para simulação de elementos lógicos (TACS e MODELS) e várias rotinas auxiliares de suporte. O TACS foi desenvolvido para simular interações dinâmicas entre a rede elétrica e os sistemas de controle de um determinado equipamento. Já o módulo MODELS é uma versão moderna do TACS, que apresenta vantagens na representação de sistemas de controle complexos.

As rotinas auxiliares de suporte tem como principal função a geração de dados ou cálculo de parâmetros necessários para a simulação de um SEP. Abaixo, cita-se algumas dessas rotinas:

- Cálculo dos parâmetros de linhas aéreas e cabos: LINE CONSTANTS, CABLE CONSTANTS e CABLE PARAMETERS;
- Geração de dados de entrada para modelos de linhas dependentes da frequência: JMARTI SETUP e SEMLYEN SETUP;
- Cálculo dos parâmetros R e L para transformadores: XFORMER e BCTRAN;
- Rotinas para obtenção das características de saturação e características magnéticas de transformadores, considerando-se a histerese do núcleo: SATURATION e HYSTERESIS.

Cabe colocar que a entrada dos dados para a realização de uma simulação é feita por meio de "cartões", sendo que a estrutura e informações presentes em cada tipo de cartão são bem específicas e rígidas. Para uma leitura e aplicações diversas, coloca-se que a documentação do ATP se encontra no manual do programa *ATP Rule Book* (ATP, 1987), onde estão todas as informações sobre os vários modelos disponíveis.

3.2 O Sistema Elétrico Analisado

Cabe frisar que a simulação computacional é uma etapa importante deste projeto, uma vez que por meio desta foram gerados os dados necessários ao processamento e validação do algoritmo proposto. É importante comentar que tal modelagem é resultado de um esforço conjunto de membros do Laboratório de Sistemas de Energia Elétrica (LSEE), alocado junto ao Departamento de Engenharia Elétrica, da Escola de Engenharia de São Carlos, onde o presente projeto foi desenvolvido.

A Figura 3.1 ilustra o modelo representativo do SEP simulado por meio do *software* ATP. Tal sistema é, basicamente, o mesmo apresentando por (Barbosa, 2007) com algumas modificações, como a inclusão de transformadores em paralelo e da malha de controle de tensão. O sistema é composto por um gerador síncrono trifásico de 13,8KV com potência de 90MVA, conectado em estrela aterrado e ligado ao barramento geral com capacidade de transmissão nominal de 75MVA. No barramento estão conectados três transformadores elevadores (13,8/138KV), de 25MVA cada, fornecendo energia à três linhas de transmissão, sendo duas delas com comprimento de 50Km e uma de 100Km de extensão. É importante ressaltar que os transformadores TR2E e TR3E, denotados na figura, estão em paralelo para a caracterização e testes referentes à situação de *sympathetic inrush*. Ao final de cada linha de transmissão estão conectados transformadores abaixadores (138/13,8KV) seguidos de cargas com diferentes potências e fatores de potências. Vale comentar que os TCs, TPs e TPCs necessários para a aquisição dos dados do sistema também foram modelados, embora estes não estejam representados na figura apresentada, assim como os controladores de velocidade e de tensão acoplados ao gerador. Na Figura 3.1, também, está representando um Motor de Indução Trifásico (MIT) conectado ao sistema (Gibelli, 2009).

O sistema modelado apresenta um único gerador síncrono, responsável pelo fornecimento da energia elétrica e pela manutenção da potência fornecida ao sistema como um todo. Com a utilização de um único gerador síncrono, este age como uma fonte de tensão cuja frequência é determinada pela fonte primária Barbosa (2007), possibilitando 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 (2007). Junto ao gerador foram modelados reguladores de velocidade para desvios da frequência e reguladores de tensão, que mantém a tensão de saída do gerador constante. A modelagem da malha de controle de frequência

Figura 3.1: Sistema elétrico simulado e em análise.

aqui utilizada é apresentada em Barbosa (2007). Já a malha de controle da tensão foi modelada conforme apresentado em Barbosa *et al.* (2008) e em Saldana *et al.* (2006).

A modelagem das linhas de transmissão foi realizada considerando-se os parâmetros distribuídos e variantes com a frequência, por meio da rotina JMARTI. Todos os dados referentes a modelagem da linha podem ser verificados em Barbosa (2007). Com relação as 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.

Para a representação dos transformadores, equipamentos em análise neste estudo, utilizou-se de uma modelagem completa via ATP. Para analisar o comportamento destes equipamentos foram consideradas as relações de transformação, a curva de saturação e as conexões dos enrolamentos delta e estrela. A curva de saturação foi caracterizada pela utilização da rotina SATURATION, e os dados utilizados nesta rotina foram extraídos de Bernardes (2006). A Figura 3.2 apresenta o cartão do ATP utilizado para modelar o transformador TR2E ilustrado na Figura 3.1. Cabe salientar que para a simulação de um transformador trifásico foram utilizados três transformadores monofásicos, como pode ser observado na Figura 3.2.

Para a simulação de faltas internas ao transformador, tanto o enrolamento primário, quanto o secundário do TR2E, 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 resistência, indutância e tensão relativas à terra. A Figura 3.3 exemplifica as partições do enrolamento, como supracitado. Este

```

C -----
C TRANSFORMADOR ELEVADOR 2 - TRAF0 2 - dYN1
C -----
C TRANSFORMER><      >< ><FLUX><BUST><RMAG><      >F
TRANSFORMER      1.8E-4268995TE2A 63000.
1.83695248E-04 2.68995271E+05
5.69522353E-04 2.98883634E+05
3.61114153E-03 3.28771998E+05
2.23530399E-02 3.43716180E+05
6.59503674E-02 3.52682689E+05
9999
C <BUS1><BUS2><      >< R >< L ><VRAT><      >I
1TE2SA NEUT2      1.048091.57779.674
2TE2PA N80E2A      350E-3 .30282.7607
3N80E2AN50E2A      525E-3 .45424.1398
4N50E2AN30E2A      350E-3 .30282.7598
5N30E2AN10E2A      350E-3 .30282.7598
6N10E2AN05E2A      875E-4 .0757.68996
7N05E2ATE2PC      875E-4 .0757.68996
C segundo transformador
TRANSFORMER TE2A      TE2B
1TE2SB NEUT2
2TE2PB N80E2B
3N80E2BN50E2B
4N50E2BN30E2B
5N30E2BN10E2B
6N10E2BN05E2B
7N05E2BTE2PA
C terceiro transformador
TRANSFORMER TE2A      TE2C
1TE2SC NEUT2
2TE2PC N80E2C
3N80E2CN50E2C
4N50E2CN30E2C
5N30E2CN10E2C
6N10E2CN05E2C
7N05E2CTE2PB
C FINAL DA DESCRIÇÃO DO TRANSFORMADOR 2

```

Figura 3.2: Parte do arquivo do ATP exemplificando o formato de entrada do cartão para modelagem do transformador.

particionamento, também, pode ser verificado na Figura 3.2 que apresenta o cartão utilizado para modelar o transformador. A aplicação de uma falta em N10E2A, ilustrado na Figura 3.3, a partir do fechamento da chave correspondente, resultará em um defeito aplicado a 10% do enrolamento. Analogamente, a aplicação de falta em N50E2A resultará em um defeito a 50% do enrolamento e, para falta em N80E2A, a percentagem do enrolamento envolvido no defeito será de 80%.

As faltas internas caracterizadas, tanto do lado primário, quanto do lado secundário do transformador, foram dos tipos: fase-terra, fase-fase, ou entre enrolamentos de uma mesma fase. Deste modo, foram simuladas várias situações de faltas internas, variando-se a porcentagem do enrolamento envolvido na falta e o ângulo de inserção desta situação, em ambos os lados do transformador TR2E. Os valores de ângulos de fase utilizados para a inserção de faltas está indicado na Figura 3.4 pela região hachurada. A variação do ângulo de inserção de falta foi feita com um passo de 15°, com a primeira inserção ocorrendo a 270° e a última a 90°, totalizando treze variações de ângulo para cada situação de falta. A Tabela 3.1 apresenta todas as situações de faltas internas ao transformador simuladas.

Figura 3.3: Modelo do transformador utilizado, exemplificando as partições do enrolamento primário para simulações de faltas internas. Adaptado de: Bernardes (2006).

A Figura 3.5 apresenta o trecho do código do ATP onde são inseridas as chaves no lado primário do transformador inicialmente abertas, caracterizando a situação de regime permanente. Na máscara utilizada para a modelagem de uma chave, as informações localizadas no espaço correspondente a "*Tag*" < N1 > < N2 > indicam os pontos seccionados pela chave. Já a "*Tag*" < TCLOSE > indica o tempo de fechamento da chave. A simulação de um determinado tipo de falta é feita com o fechamento da chave relacionada à falta que se pretende aplicar, no instante de tempo correspondente ao ângulo pretendido. As faltas simuladas no secundário do transformador são obtidas da mesma forma que as obtidas no primário. Importa ressaltar que

Figura 3.4: valores utilizados para variação dos ângulos de fase na aplicação de faltas.

C-----						
C CHAVES PARA FALTAS INTERNAS ENTRE FASES NO TRAF0 2 - PRIMÁRIO						
C-----						
C < N 1>< N 2>< TCLOSE ><TOP/TDE >< IE ><VF/CLOP >< TYPE >						
N80E2AN80E2B	1.00E+04	2.000E+04	0.000E+00			0
N50E2AN50E2B	1.00E+04	2.000E+04	0.000E+00			0
N30E2AN30E2B	1.00E+04	2.000E+04	0.000E+00			0
N10E2AN10E2B	1.00E+04	2.000E+04	0.000E+00			0
N05E2AN05E2B	1.00E+04	2.000E+04	0.000E+00			0
C-----						
C CHAVES PARA FALTAS INTERNAS ENTRE ESPIRAS NO TRAF0 2 - PRIMÁRIO						
C-----						
C < N 1>< N 2>< TCLOSE ><TOP/TDE >< IE ><VF/CLOP >< TYPE >						
N80E2AN50E2A	1.00E+04	2.000E+04	0.000E+00			0
N50E2AN30E2A	1.00E+04	2.000E+04	0.000E+00			0
N30E2AN10E2A	1.00E+04	2.000E+04	0.000E+00			0
N10E2AN05E2A	1.00E+04	2.000E+04	0.000E+00			0
N50E2AN10E2A	1.00E+04	2.000E+04	0.000E+00			0
N30E2AN05E2A	1.00E+04	2.000E+04	0.000E+00			0
C-----						

Figura 3.5: Parte do arquivo do ATP com as chaves utilizadas para aplicação de faltas internas no primário do transformador.

o transformador TR3E, que opera em paralelo com o transformador em que foram aplicadas as faltas, não deve ser afetado pela ocorrência da falta em TR2E. TR3E deve considerar a falta em TR2E como sendo uma falta externa, não sendo sensibilizado por sua ocorrência.

Para gerar situações de energização foi inserida uma chave, inicialmente aberta, isolando o transformador TR2E da fonte alimentadora. Sendo assim, esta chave foi fechada em um determinado instante de tempo, iniciando a energização deste transformador. A chave foi fechada em instantes de tempo diferentes, variando-se o ângulo de inserção da energização, da mesma forma que o realizado para a inserção das faltas, produzindo um total de treze casos de energização, conforme ilustra a Tabela 3.2. Ressalta-se que as situações de energização simuladas em TR2E ocasionaram alterações na forma de onda da corrente em TR3E, caracterizando o fenômeno de energização solidária.

Também foram simuladas situações de energização sob falta interna no transformador TR2E. Para tanto, uma das chaves que particionam os enrolamentos do transformador encontra-se fechada, caracterizando uma situação de falta, antes do início da energização. A chave que encontra-se fechada corresponde ao tipo de falta que se pretende aplicar ao transformador, como explicado anteriormente. A Tabela 3.3 apresenta as situações de energização sob falta simuladas. A influência destas situações, também, foi observada no transformador que opera em paralelo com o que está sendo energizado sob falta.

Outra situação considerada foi a sobreexcitação do transformador. Para caracterizar tal situação, elevou-se a tensão da fonte de alimentação, com valores variando de 110% a 170% da tensão nominal, com um passo de 1%. Com isto, foi gerado um total de 60 situações de sobreexcitação em cada transformador, conforme apresentado na Tabela 3.2. Como a sobreexcitação foi

Tabela 3.1: Situações simuladas de faltas internas ao transformador.

Lado Envolvido	Tipo de Falta	% do Enrolamento	Varição do Ângulo de Falta	Nº de Faltas
Primário	Fase-Fase	5%	270° a 90°	13
Primário	Fase-Fase	10%	270° a 90°	13
Primário	Fase-Fase	30%	270° a 90°	13
Primário	Fase-Fase	50%	270° a 90°	13
Primário	Fase-Fase	80%	270° a 90°	13
Primário	Entre Espiras	80% e 50%	270° a 90°	13
Primário	Entre Espiras	50% e 30%	270° a 90°	13
Primário	Entre Espiras	30% e 10%	270° a 90°	13
Primário	Entre Espiras	10% e 5%	270° a 90°	13
Primário	Entre Espiras	50% e 10%	270° a 90°	13
Primário	Entre Espiras	30% e 5%	270° a 90°	13
Secundário	Fase-Terra	5%	270° a 90°	13
Secundário	Fase-Terra	10%	270° a 90°	13
Secundário	Fase-Terra	30%	270° a 90°	13
Secundário	Fase-Terra	50%	270° a 90°	13
Secundário	Fase-Terra	80%	270° a 90°	13
Secundário	Fase-Fase	5%	270° a 90°	13
Secundário	Fase-Fase	10%	270° a 90°	13
Secundário	Fase-Fase	30%	270° a 90°	13
Secundário	Fase-Fase	50%	270° a 90°	13
Secundário	Fase-Fase	80%	270° a 90°	13
Secundário	Entre Espiras	80% e 50%	270° a 90°	13
Secundário	Entre Espiras	50% e 30%	270° a 90°	13
Secundário	Entre Espiras	30% e 10%	270° a 90°	13
Secundário	Entre Espiras	50% e 10%	270° a 90°	13
Total				325

Tabela 3.2: Situações simuladas de energização do transformador.

Varição do Ângulo de Energização	Lado Envolvido	Nº de Situações
270° a 90°	Primário	13

ocasionada pela elevação da tensão nominal da fonte, que é comum a todos os transformadores conectados no sistema, todos os transformadores devem ser afetados da mesma forma na ocorrência desta situação.

A partir das simulações realizadas foi gerado um banco de dados com um total de 723 situações, contemplando os vários eventos que se pretende analisar. Deste total, de forma aleatória, foram tomados 170 casos para testar a lógica a ser apresentada no próximo capítulo. Cabe afirmar que apesar do aspecto aleatório colocado, garantiu-se que este conjunto teste formulado, apresentasse, aproximadamente, 25% das situações de cada um dos eventos simulados, conforme ilustra a Tabela 3.5.

Tabela 3.3: Situações simuladas de energização do transformador sob falta interna.

Varição do Âng. de Ene.	Lado Envolvido	Tipo de Falta	% do Enrolamento	Nº de Situações
270° a 90°	Primário	Fase-Fase	5%	13
270° a 90°	Primário	Fase-Fase	10%	13
270° a 90°	Primário	Fase-Fase	30%	13
270° a 90°	Primário	Fase-Fase	50%	13
270° a 90°	Primário	Fase-Fase	80%	13
270° a 90°	Primário	Entre Espiras	80% e 50%	13
270° a 90°	Primário	Entre Espiras	50% e 30%	13
270° a 90°	Primário	Entre Espiras	30% e 10%	13
270° a 90°	Primário	Entre Espiras	10% e 5%	13
270° a 90°	Primário	Entre Espiras	50% e 10%	13
270° a 90°	Primário	Entre Espiras	30% e 5%	13
270° a 90°	Secundário	Fase-Terra	5%	13
270° a 90°	Secundário	Fase-Terra	10%	13
270° a 90°	Secundário	Fase-Terra	30%	13
270° a 90°	Secundário	Fase-Terra	50%	13
270° a 90°	Secundário	Fase-Terra	80%	13
270° a 90°	Secundário	Fase-Fase	5%	13
270° a 90°	Secundário	Fase-Fase	10%	13
270° a 90°	Secundário	Fase-Fase	30%	13
270° a 90°	Secundário	Fase-Fase	50%	13
270° a 90°	Secundário	Fase-Fase	80%	13
270° a 90°	Secundário	Entre Espiras	80% e 50%	13
270° a 90°	Secundário	Entre Espiras	50% e 30%	13
270° a 90°	Secundário	Entre Espiras	30% e 10%	13
270° a 90°	Secundário	Entre Espiras	50% e 10%	13
Total				325

Tabela 3.4: Situações simuladas de sobreexcitação do transformador.

Varição da Tensão da Alimentação	Passo	Nº de Situações por Transformador
110% a 170%	1%	60

3.3 Pré-processamento dos Sinais Originários do ATP

Para deixar a simulação do SEP proposto fidedigna ao real encontrado em campo, cabe afirmar que também foram considerados os processos de aquisição e condicionamento dos sinais a serem utilizados pelo algoritmo de classificação proposto.

O processo de aquisição é realizado pelos TCs, TP's e TPCs modelados no sistema. A modelagem destes equipamentos teve como objetivo adequar os sinais provenientes das várias situações às quais o transformador foi submetido a níveis que possam ser utilizados pelos equipamentos de monitoramento e de medição conectados a um SEP. Além disto, com esta

Tabela 3.5: Quantidade de eventos analisados.

Evento	Nº de Situações
Falta Interna	75
Energização	5
Energização Sob Falta	75
Sobreexcitação	15
Total	170

modelagem, pode-se observar a influência de tais equipamentos na resposta do algoritmo.

É importante ressaltar que neste trabalho supõe-se que os sinais de corrente e tensão provenientes da simulação são sinais no domínio analógico, para tanto, estes foram gerados com uma taxa de amostragem bastante alta na simulação, de forma a aproximar os sinais discretos oriundos da simulação à sinais contínuos no tempo. Esta aproximação é uma tentativa de deixar a simulação do sistema elétrico e a apresentação dos dados ao algoritmo proposto neste trabalho o mais próximo possível do real, fazendo com que os dados provenientes da simulação passem por todas as fases que passariam se fossem registrados em um sistema real. Desta forma, considera-se as influências do uso de filtros passa-baixas, ainda no domínio analógico, e da digitalização dos sinais de corrente e tensão originários dos equipamentos de aquisição modelados no ATP.

Outro procedimento que deve ser realizado antes dos dados serem processados pelo algoritmo é a correção da defasagem dos sinais de corrente entre o lado primário e secundário do transformador. Tem-se que considerar, também, a eliminação da componente de sequência zero dos sinais de corrente uma vez que, na presença desta componente, o algoritmo pode responder de forma incorreta para determinadas situações.

A Figura 3.6 ilustra todos os procedimentos de pré-processamento considerados, desde a aquisição dos dados junto ao transformador até a entrega destes ao algoritmo a ser proposto. As etapas de pré-processamento serão explicados no que segue.

3.3.1 Filtragem do Sinal

O SEP opera com sinais de tensão e corrente senoidais com uma frequência fundamental de 60 Hz. Entretanto, por vários fatores, caracterizam-se outras frequências no SEP diferentes da fundamental, sendo que tais frequências podem causar efeitos indesejados ao sistema, em virtude da sobreposição de espectros (efeito *aliasing*) (Mitra, 1998). Neste contexto, tem-se que

Figura 3.6: Fluxograma das etapas de processamento consideradas.

as altas frequências presentes no SEP podem provocar erros na conversão A/D, e para contornar este problema, utilizam-se filtros analógicos com o intuito de eliminar frequências indesejáveis antes que o sinal passe pelo conversor. Assumindo que os sinais de tensão e corrente são gerados no domínio analógico, como fora anteriormente mencionado, estes necessitam de um condicionamento para serem convertidos ao domínio digital, sendo este processo realizado por um filtro analógico.

Da prática, para possibilitar o correto funcionamento do conversor analógico digital, utilizam-se filtros *Antialiasing* antes do Conversor Analógico/Digital (CAD). Um filtro *Antialiasing* é um filtro do tipo passa-baixas, com uma frequência de corte pré-determinada baseada na frequência

de amostragem usada pelo conversor A/D, de modo a satisfazer o teorema da amostragem (Mitra, 1998). O principal filtro usado para esta função em SEPs é o filtro *Butterworth* (Coury *et al.*, 2007). Esta escolha se deve a algumas características deste filtro, como resposta em frequência muito plana, ou seja, sem *ripple* ou ondulações na banda passante, além de sua resposta em frequência se aproximar de zero na banda rejeitada.

Sabendo-se que a característica de amplitude de um filtro ideal é plana na faixa de passagem, o filtro de *Butterworth* tenta aproximar esta característica através de uma função polinomial no domínio da frequência, de modo que ela seja plana na faixa de passagem. Assim, este filtro é caracterizado por uma resposta de amplitude que é plana na faixa de passagem e por uma resposta decrescente na banda de rejeição, acima da frequência de corte. Conforme a ordem do filtro aumenta, a sua resposta de amplitude torna-se mais plana na faixa de passagem, e a taxa de atenuação na banda de transição torna-se mais acentuada (Madisetti e Williams, 1998).

Outra característica importante de um filtro é a sua resposta ao degrau, que traz uma série de indicações sobre o comportamento transitório do filtro. Uma das informações obtidas da resposta ao degrau é o tempo de subida ou *rise time*. O tempo de subida indica o período entre o estímulo, sinal de entrada, e a resposta do filtro, mostrando o retardo provocado pelo filtro no sinal a ser processado. Com isto, é possível verificar os prejuízos que o filtro pode causar ao sinal. Observa-se a influência da ordem do filtro na defasagem e no tempo de resposta do mesmo, evidenciando um parâmetro importante que deve ser utilizado na construção do filtro, e levado em conta no momento da escolha do filtro que vai ser utilizado em uma determinada aplicação (Coury *et al.*, 2007).

O comportamento do filtro *Butterworth* muito se aproxima do comportamento de um filtro passa-baixa ideal, principalmente os de ordem mais elevada. Contudo, muitas das vezes, filtros de ordem muito elevada não são aconselháveis devido ao atraso, por eles inserido, no sinal filtrado. Para esta aplicação em específico, por vários testes e indicativos observados sobre o sistema em análise, o filtro escolhido para ser aplicado foi o *Butterworth* de segunda ordem, com uma frequência de corte de 480 Hz.

3.3.2 Conversão Analógico/Digital

Para um sinal analógico, contínuo no tempo, ser analisado computacionalmente, é necessário digitalizá-lo por meio de um CAD. Neste sentido, a digitalização é um passo importante na análise de um sinal, pois dependendo dos parâmetros escolhidos para representá-lo, a

representação deste sinal pode ser ou não fiel.

É importante salientar que a escolha da taxa amostral é de grande importância para uma melhor representação de um sinal na forma digital, pois para uma taxa amostral maior, mais pontos são utilizados para representá-lo. Entretanto, para certas aplicações, uma taxa amostral muito alta não é conveniente, sendo que esta escolha deve ser bem ponderada.

A habilidade de um conversor em representar um sinal analógico através de uma representação digital suficientemente detalhada está diretamente relacionada com a resolução do conversor. A resolução depende da quantidade de níveis de quantização do conversor, dada por (2^N) , onde N é o número de bits do conversor. A equação da resolução de um conversor pode ser caracterizada como segue (Madisetti e Williams, 1998):

$$Q = \frac{A_{max}}{2^N - 1}, \quad (3.1)$$

onde A_{max} é a amplitude máxima do sinal.

A quantidade de níveis de quantização indica a quantidade de valores que cada amostra do sinal original pode assumir em cada instante de tempo, sendo que cada amostra será aproximada, a cada instante de tempo, para o nível de quantização mais próximo do seu valor original. Fica claro que este processo insere um erro na representação digitalizada do sinal, o erro de quantização, que no máximo é igual a metade de um nível de quantização. A medida que se aumenta o número de bits, o erro de quantização diminui, fazendo com que a correta escolha deste parâmetro seja de grande importância para a melhor representação do sinal a ser digitalizado (Madisetti e Williams, 1998).

Afirma-se que para esta pesquisa, os sinais de tensões e correntes provenientes do ATP foram reamostrados e digitalizados a uma taxa de 960 Hz (16 amostras/ciclo) de forma a respeitar o teorema da amostragem (Mitra, 1998), uma vez que os sinais foram filtrados considerando-se uma a frequência de corte de 480 Hz. Já para a quantização, adotou-se um conversor de 12 bits.

3.3.3 Correção da Defasagem

O ângulo de fase entre as correntes dos lados primário e secundário do transformador apresenta uma certa defasagem, além da defasagem de 180° que normalmente ocorrem entre estas formas de onda, que depende do tipo de conexão do transformador. No caso da conexão delta-estrela, adotada nos transformadores elevadores presentes no SEP simulado, ocorre um

defasamento de 30° entre as correntes nos dois lados do transformador (P.S.R.C., 2008). Este defasamento adicional deve ser compensado, de forma a deixar a defasagem novamente em 180° em regime permanente.

Para a utilização de relés eletromecânicos a correção da defasagem é realizada através das conexões dos TCs. Utiliza-se TCs conectados em Y do lado delta do transformador protegido e TCs conectados em Δ do lado em estrela. Como resultado, tem-se que as correntes que passam pelo relé de proteção estão em fase com as correntes que passam pelo transformador protegido.

Quando utiliza-se de um equipamento digital, muitas das vezes, decide-se pela utilização de TCs conectados em Y em ambos os lados do transformador. Desta forma, realiza-se computacionalmente a correção do defasamento existente entre as formas de onda das correntes no primário e secundário do transformador. A opção de se conectar os TCs em estrela decorre de algumas vantagens obtidas com este tipo de ligação, como por exemplo (P.S.R.C., 2008):

- São convenientes para relés que executam múltiplas funções;
- A saturação dos TCs quando conectados desta forma é menos comum.

Para a compensação da defasagem provocada pela conexão do transformador, quando da utilização de TCs conectados em estrela tanto no primário quanto no secundário do transformador, emula-se computacionalmente o efeito da abordagem anteriormente mencionada. Este efeito é obtido multiplicando-se os valores das três fases da corrente em um dos lados do transformador por uma matriz de correção de defasagem. A referência P.S.R.C. (2008) apresenta uma tabela com as matrizes de correção de defasagem aplicadas às várias conexões possíveis. Para este trabalho, deve-se utilizar a matriz apresentada a seguir para multiplicar os valores das correntes do lado do transformador conectado em delta (lado primário):

$$\frac{1}{\sqrt{3}} \begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{pmatrix}.$$

O procedimento de correção da defasagem ocorre de acordo com a Equação (3.2) apresentada a seguir:

$$\begin{pmatrix} I'_a \\ I'_b \\ I'_c \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{pmatrix}, \quad (3.2)$$

onde I_a, I_b e I_c são as correntes das três fases capturadas pelos TCs no lado de baixa do transformador e I'_a, I'_b e I'_c são as correntes obtidas após a correção da defasagem.

Após esta operação, as correntes do lado primário e secundário do transformador estarão novamente defasadas de 180° , condição esta necessária para serem apresentadas ao classificador proposto neste trabalho.

3.3.4 Eliminação da Corrente de Seqüência Zero

A ocorrência de surtos ou falhas pode provocar o aparecimento de componente de seqüência zero nas formas de onda de corrente que passam por um transformador. No lado do transformador conectado em estrela, esta componente é percebida nas correntes que fluem em direção às cargas. A componente de seqüência zero também é percebida no lado conectado em delta, entretanto ela fica circulando nos enrolamentos do transformador, confinada em virtude da ligação em delta (P.S.R.C., 2008). Desta forma, a corrente de seqüência zero captadas pelos TCs do lado estrela do transformador não são refletidas nos TCs do lado primário conectado em delta.

A ausência da componente de seqüência zero nas correntes capturadas no lado delta pode provocar um erro no processamento do algoritmo aqui proposto, nas situações em que esta componente é evidenciada no lado do transformador ligado em estrela. Por isto, é primordial que se faça a compensação da componente de seqüência zero sempre que esta estiver presente nas formas de onda da corrente. Esta compensação é obtida removendo-se a seqüência zero das correntes do lado do transformador conectado em estrela (P.S.R.C., 2008). Para tanto, procede-se de acordo com a Equação (3.3):

$$\begin{pmatrix} I'_A \\ I'_B \\ I'_C \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{pmatrix}, \quad (3.3)$$

onde I_A, I_B e I_C são as correntes originais capturadas pelos TCs e I'_A, I'_B e I'_C são as correntes compensadas, ou seja, sem componente de seqüência zero.

Para que o algoritmo funcione adequadamente em todas as situações propostas para o SEP modelado, as formas de onda que devem ser repassadas ao classificador proposto na próxima seção são I'_a, I'_b e I'_c coletadas no lado primário (delta) e processadas de acordo com a Equação (3.2), juntamente com as correntes do lado secundário (estrela) I'_A, I'_B e I'_C obtidas por meio da Equação (3.3).

Capítulo 4

O Algoritmo Proposto

Conforme anteriormente mencionado, o principal objetivo deste trabalho é a detecção e classificação das ocorrências transitórias relacionadas com a proteção de transformadores, de modo a permitir posteriores estudos direcionados à QEE do sistema como um todo. O algoritmo proposto deve funcionar em tempo real. Sendo assim, faz-se necessário um classificador que seja rápido, robusto e eficiente. Neste contexto, este será implementado dispondo da TWP e da LF para analisar os dados provenientes das situações simuladas.

Neste capítulo será apresentado o algoritmo de detecção e classificação proposto.

4.1 O Algoritmo Proposto

A Figura 4.1 apresenta o fluxograma do algoritmo, que será explicado a seguir. Cabe adiantar que a sequência de passos apresentada é aplicada a cada uma das três fases do sistema de forma independente, sendo posteriormente tomada uma decisão sobre a ocorrência do evento, avaliando-se as respostas de cada uma das fases em conjunto.

4.1.1 Aquisição e Condicionamento dos Dados

Os dois primeiros blocos da Figura 4.1 correspondem à aquisição e ao condicionamento dos dados que são fornecidos ao algoritmo desenvolvido. Estes blocos não fazem parte do algoritmo de classificação, mas são de importância primordial para a sua correta execução.

As formas de onda das correntes medidas no primário e no secundário, provenientes das

Figura 4.1: Fluxograma básico do algoritmo proposto.

situações simuladas no ATP, são fornecidas como dados de entrada ao algoritmo. Para simular a aquisição dos dados em tempo real, ilustrada no bloco 1, realiza-se o janelamento de um ciclo dos sinais em análise, 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 TCs, conforme apresentado na Seção 3.3, representado pelo bloco 2 na Figura 4.1. Os sinais de corrente são filtrados por um filtro passa-baixas com uma frequência de corte de 480Hz e reamostrados a uma taxa de 16 amostras por ciclo da frequência fundamental. Neste ponto, elimina-se a componente de sequência zero das correntes e se corrige a defasagem entre as formas de onda do primário e secundário.

4.1.2 Aplicação da TWP para Obtenção das Entradas do Classificador

Os blocos seguintes ao condicionamento do sinal são os que já pertencem ao algoritmo implementado. Esta subseção contempla os três primeiros blocos posteriores ao condicionamento, ilustrados na Figura 4.1, que são responsáveis por fornecer as entradas do SF que vai indicar

a condição de operação do transformador. Estas entradas são obtidas pela aplicação da TWP considerando a corrente diferencial (I_d) e a corrente de restrição (I_r).

Após o condicionamento dos sinais de entrada, encontra-se I_d e I_r (bloco 3 do fluxograma) e se calcula a TWP de quarto nível destas formas de onda (bloco 4 do fluxograma), para se obter informações sobre os componentes harmônicos presentes nos sinais. Vale lembrar que, em virtude das características dos eventos associados à proteção dos transformadores, os harmônicos que interessam para esta aplicação são os de primeira, segunda e quinta ordem, conforme apontado anteriormente. A seguir, explica-se detalhadamente como a TWP foi empregada no contexto delineado.

Análise de Harmônicos com a Utilização da TWP

A referência Barros e Diego (2006) mostra como utilizar a TWP para análises relacionadas a harmônicos em SEPs. Em seu trabalho, os autores desenvolveram uma metodologia que fornece informações sobre os múltiplos da frequência fundamental de ordem ímpar presentes em um sinal elétrico. Para a aplicação da TWP no algoritmo aqui proposto, adaptou-se a metodologia apresentada de modo que também seja possível obter os componentes de ordem par. Ressalta-se que para esta aplicação é necessário uma taxa de amostragem adequada para a análise que se pretende fazer, em função do nível de decomposição que deve ser alcançado com a TWP.

A TWP de nível 4 aplicada a uma janela de dados resulta na árvore de decomposição ilustrada na Figura 4.2, na qual estão destacadas as folhas utilizadas para fornecer as características pretendidas. Este nível foi escolhido por permitir o isolamento das faixas de frequência características de cada evento a ser classificado. A Tabela 4.1 indica a faixa de frequência delimitada por cada uma das folhas destacadas na Figura 4.2, bem como a quantidade de amostras em cada uma. Na mesma tabela, encontram-se, também, as informações sobre o sinal de entrada da TWP.

Para a determinação dos valores *RMS* dos harmônicos de segunda e quinta ordem, aplicou-se as Equações (4.1) e (4.2), respectivamente:

$$I_2 = \sqrt{\frac{(D_{2,4})^2 + (A_{3,4})^2}{2}}, \quad (4.1)$$

Figura 4.2: Árvore de decomposição da TWP de nível 4.

Tabela 4.1: Faixas de frequência quando da aplicação da TWP nível 4 à cada janela do sinal de corrente.

Folha da TWP	Nº de amostras	Faixa de frequência (Hz)
Sinal Original	16	0 ~ 480
$D_{1,4}$	1	30 ~ 60
$A_{2,4}$	1	60 ~ 90
$D_{2,4}$	1	90 ~ 120
$A_{3,4}$	1	120 ~ 150
$D_{5,4}$	1	270 ~ 300
$A_{6,4}$	1	300 ~ 330

$$I_5 = \sqrt{\frac{(D_{5,4})^2 + (A_{6,4})^2}{2}}. \quad (4.2)$$

A utilização das folhas $D_{2,4}$ e $A_{3,4}$ para o cálculo do segundo harmônico foi em função da frequência de 120 Hz se encontrar no meio da faixa delimitada por estas duas folhas (Tabela 4.1). Esta mesma idéia é aplicada para se encontrar o harmônico de quinta ordem (300 Hz), já que este é o valor intermediário da banda delimitada pelas folhas $D_{5,4}$ e $A_{6,4}$. Os valores dos componentes harmônicos calculados pela TWP são normalizados pelo valor *RMS* da componente de frequência fundamental (60 Hz), obtido através da Equação (4.3):

$$I_F = \sqrt{\frac{(D_{1,4})^2 + (A_{2,4})^2}{2}}. \quad (4.3)$$

Esta forma de obtenção dos conteúdos harmônicos dos sinais elétricos foi validada com a simulação de alguns sinais, gerados matematicamente, dos quais se sabia exatamente os valores de todas as frequências presentes. Nestes sinais foram aplicadas várias funções *wavelets* para se verificar quais delas apresentavam melhores resultados sobre a composição espectral no sinal.

Ressalta-se que pela técnica adotada, em virtude do tamanho da janela de dados disponibilizada para a análise (16 amostras), é possível a observação dos harmônicos de primeira à sétima ordem. A Figura 4.3 ilustra um dos sinais gerados, bem como as respostas das *wavelets* testadas para uma janela deslocada sobre este sinal. A Tabela 4.2 apresenta os valores obtidos quando da análise ilustrada pela Figura 4.3.

Figura 4.3: Sinal gerado matematicamente com conteúdo harmônico conhecido e analisado por várias *wavelets*.

Tabela 4.2: Faixas de frequência da TWP nível 4 de uma janela do sinal de corrente.

Harm.	% Ins.	% Db16	% Db18	% Db20	% Db22	% D24	% B18	% Vd24	% Cf24
1	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
2	18,0	17,96	17,99	18,02	18,01	17,99	18,01	17,99	17,98
3	8,0	9,19	10,69	9,45	6,32	5,03	10,09	7,07	4,97
4	10,0	9,98	10,01	10,01	10,01	9,99	10,01	10,01	9,99
5	15,0	12,68	13,27	14,78	15,92	16,07	14,35	15,46	15,78
6	0,0	0,40	0,28	0,19	0,13	0,09	0,18	0,01	0,35
7	0,0	0,28	0,21	0,16	0,12	0,08	0,17	0,01	0,31

A primeira coluna da Tabela 4.2 indica a ordem do harmônico inserido, a segunda coluna aponta, precisamente, o conteúdo harmônico inserido no sinal simulado (em % da fundamental). As demais colunas mostram os valores calculados para cada um dos harmônicos pela

utilização de diferentes funções *wavelets*, sempre em % da fundamental. Da terceira à sétima coluna apresentam-se os valores encontrados com a utilização de *wavelets* da família *Daubechies*, na seguinte ordem: *Daubechies16* (*Db16*), *Daubechies18* (*Db18*), *Daubechies20* (*Db20*), *Daubechies22* (*Db22*) e *Daubechies24* (*Db24*). A oitava coluna mostra os valores obtidos pela aplicação da *Beylkin18* (*Bl18*). Na nona coluna tem-se os resultados utilizando-se *Vaidyanathan24* (*Vd24*), e a última coluna os resultados com *Coiflet24* (*Cf24*).

Observando a Tabela 4.2, verifica-se que a *wavelet* que apresentou o menor erro, em média, para a determinação dos conteúdos harmônicos foi a *Vd24*. Afirma-se que em todos os testes realizados, com a utilização de vários sinais simulados com conteúdos espectrais variados, e com o deslocamento da janela de dados sobre estes sinais, esta sempre foi a função que apresentou o menor erro (menor que 1%). O bom desempenho desta *wavelet* aponta que ela é uma boa escolha para determinação dos componentes de frequência de um sinal. Após a *Vd24*, quem teve o melhor desempenho foi a *Db20*, podendo, também, ser utilizada para este fim.

Obtenção das Entradas do SF

Após o processamento das correntes I_d e I_r pela TWP é possível encontrar as variáveis que servirão de entrada para o SF. Este passo do algoritmo está representado pelo bloco 5 na Figura 4.1. O sistema possui três entradas, sendo que a primeira (I_{dF}/I_{rF}) é obtida pela Equação (4.4):

$$I_{dF}/I_{rF} = \frac{I_{dF}}{I_{rF}}. \quad (4.4)$$

onde I_{dF} corresponde ao valor *RMS* do harmônico de primeira ordem da corrente diferencial e I_{rF} corresponde ao valor *RMS* do harmônico de primeira ordem da corrente de restrição, obtidos pela aplicação da Equação (4.3) em I_d e em I_r , respectivamente.

A segunda entrada (I_{d2}) do SF é relativa ao conteúdo harmônico de segunda ordem presente na corrente diferencial, obtida pela aplicação da Equação (4.1) à I_d . Já a terceira entrada (I_{d5}) corresponde ao quinto harmônico evidenciado sobre a corrente diferencial por meio da aplicação da Equação (4.2) em I_d . Neste contexto, acredita-se que as entradas fornecidas ao classificador representam as características básicas para a solução do problema.

Contudo, vale adiantar e afirmar que, quando da fase de teste sobre o algoritmo em apresentação, a *wavelet* com a qual foi possível realizar os melhores ajustes das regras *fuzzy* e com a qual se obteve melhores resultados foi a *Db20*. Por isto, esta foi utilizada para a obtenção das

variáveis de entrada do SF caracterizado a seguir.

É importante ressaltar que neste trabalho fez-se uso da biblioteca de TW desenvolvida e gentilmente disponibilizada pelo Prof. Dr. Rodrigo Capobianco Guido, do Instituto de Física de São Carlos (IFISC). Através desta biblioteca, concebida na linguagem de programação “C”, foram realizadas todas as análises que dispõem da TWP.

4.1.3 O SF modelado

O SF desenvolvido neste trabalho, correspondente ao bloco 6 do fluxograma apresentado no início deste capítulo. Este tem a tarefa de indicar se um transformador opera em regime permanente, ou, em caso contrário, se houve a ocorrência de alguma dessas situações transitórias:

- falta interna;
- energização;
- energização solidária e
- sobreexcitação do transformador principal.

A Figura 4.4 representa a estrutura do SF modelado, ilustrando os procedimentos de *fuzzy*-*ficação*, inferência e *defuzzy*-*ficação*.

Figura 4.4: Estrutura do SF utilizado.

Cabe frisar que o SF apresentado na Figura 4.4 possui três entradas, uma variável de saída e somente oito regras de inferência. Importa ressaltar que as variáveis de entrada, os limites e formatos das suas funções de pertinência, além das regras de inferência, foram definidas através do conhecimento prévio acerca dos conteúdos espectrais geralmente presentes nas diversas situações estudadas. A partir dos valores iniciais estabelecidos para as funções de pertinência foram realizados inúmeros testes até serem alcançados os ajustes apresentados a seguir. As variáveis de entrada (I_{dF}/I_{rF} , I_{d2} e I_{d5}) e a de saída (*Evento*) estão ilustradas na Figura 4.5.

Figura 4.5: Funções de pertinência das variáveis lingüísticas do SF modelado.

Conforme observado, a variável de entrada I_{dF}/I_{rF} é composta por dois termos *fuzzy*: Baixa (Ba) e Alta (Al). Cada um destes termos é definido por uma função de pertinência retangular, sendo que a Equação (4.5) define a função de pertinência do termo *Ba*, e a Equação (4.6) define a do termo *Al*, como pode ser verificado na Figura 4.5 (a) apresentada.

$$\mu_{Ba}(I_{dF}/I_{rF}) = \begin{cases} 1, & \text{se } I_{dF}/I_{rF} \in [2.5, 8] \\ \frac{26-x}{26-8}, & \text{se } I_{dF}/I_{rF} \in [8, 26] \\ 0, & \text{se } I_{dF}/I_{rF} \in [26, 100] \end{cases} \quad (4.5)$$

$$\mu_{Al}(I_{dF}/I_{rF}) = \begin{cases} 0, & \text{se } I_{dF}/I_{rF} \in [2.5, 8] \\ \frac{x-8}{26-8}, & \text{se } I_{dF}/I_{rF} \in [8, 26] \\ 1, & \text{se } I_{dF}/I_{rF} \in [26, 100] \end{cases} . \quad (4.6)$$

Já as variáveis I_{d2} e I_{d5} estão ilustradas nas Figuras 4.5 (b) e 4.5 (c), respectivamente. Cada uma destas variáveis têm dois termos *fuzzy* associados, Baixa (Ba) e Alta(Al). As funções de pertinência que representam estes termos são retangulares e estão definidas pelas Equações (4.7) e (4.8) para I_{d2} e Equações (4.9) e (4.10) para I_{d5} :

$$\mu_{Ba}(I_{d2}) = \begin{cases} 1, & \text{se } I_{d2} \in [0, 8] \\ \frac{16-x}{16-8}, & \text{se } I_{d2} \in [8, 16] \\ 0, & \text{se } I_{d2} \in [16, 100] \end{cases} , \quad (4.7)$$

$$\mu_{Al}(I_{d2}) = \begin{cases} 0, & \text{se } I_{d2} \in [0, 8] \\ \frac{x-8}{16-8}, & \text{se } I_{d2} \in [8, 16] \\ 1, & \text{se } I_{d2} \in [16, 100] \end{cases} , \quad (4.8)$$

$$\mu_{Ba}(I_{d5}) = \begin{cases} 1, & \text{se } I_{d5} \in [0, 8] \\ \frac{16-x}{16-8}, & \text{se } I_{d5} \in [8, 16] \\ 0, & \text{se } I_{d5} \in [16, 100] \end{cases} , \quad (4.9)$$

$$\mu_{Al}(I_{d5}) = \begin{cases} 0, & \text{se } I_{d5} \in [0, 8] \\ \frac{x-8}{16-8}, & \text{se } I_{d5} \in [8, 16] \\ 1, & \text{se } I_{d5} \in [16, 100] \end{cases} . \quad (4.10)$$

A variável de saída (*Evento*) está ilustrada na Figura 4.5 (d). Esta é composta pelo seguinte conjunto de termos *fuzzy*: regime permanente (Reg), energização (Ene), energização solidária (EnS), sobreexcitação (Sbe) e falta interna ao transformador protegido (FIn). Os termos *fuzzy* associados a esta variável são representados por conjuntos *Fuzy* unitários (*singletons*), e as suas funções de pertinências são definidas pelas Equações (4.11 - 4.15) que seguem:

$$\mu_{Reg}(\text{Evento}) = \begin{cases} 0, & \text{se } x \neq 1 \\ 1, & \text{se } x = 1 \end{cases} , \quad (4.11)$$

$$\mu_{Ene}(Evento) = \begin{cases} 0, & \text{se } x \neq 2 \\ 1, & \text{se } x = 2 \end{cases}, \quad (4.12)$$

$$\mu_{EnS}(Evento) = \begin{cases} 0, & \text{se } x \neq 3 \\ 1, & \text{se } x = 3 \end{cases}, \quad (4.13)$$

$$\mu_{Sbe}(Evento) = \begin{cases} 0, & \text{se } x \neq 4 \\ 1, & \text{se } x = 4 \end{cases}, \quad (4.14)$$

$$\mu_{FIIn}(Evento) = \begin{cases} 0, & \text{se } x \neq 5 \\ 1, & \text{se } x = 5 \end{cases}. \quad (4.15)$$

A representação da variável de saída por conjuntos *singletons* se deu para facilitar o procedimento de *defuzzyficação*, visto que para a obtenção do valor da variável de saída, não são necessários muitos cálculos adicionais. O método de *defuzzyficação* será exposto após a enumeração das regras do sistema *fuzzy*.

Conforme anteriormente comentado, o SF é composto por oito regras lingüísticas, a saber:

1. **SE** (I_{dF}/I_{rF} É Baixa) **E** (I_{d2} É Baixa) **E** (I_{d5} É Baixa) **Então** (Evento É Regime)
2. **SE** (I_{dF}/I_{rF} É Alta) **E** (I_{d2} É Baixa) **E** (I_{d5} É Baixa) **Então** (Evento É Falta Interna)
3. **SE** (I_{dF}/I_{rF} É Alta) **E** (I_{d2} É Alta) **E** (I_{d5} É Baixa) **Então** (Evento É Energização)
4. **SE** (I_{dF}/I_{rF} É Alta) **E** (I_{d2} É Alta) **E** (I_{d5} iÉ Alta) **Então** (Evento É Energização)
5. **SE** (I_{dF}/I_{rF} É Baixa) **E** (I_{d2} É Alta) **E** (I_{d5} É Baixa) **Então** (Evento É Energização Solidária)
6. **SE** (I_{dF}/I_{rF} É Baixa) **E** (I_{d2} É Alta) **E** (I_{d5} É Alta) **Então** (Evento É Energização Solidária)
7. **SE** (I_{dF}/I_{rF} É Baixa) **E** (I_{d2} É Baixa) **E** (I_{d5} É Alta) **Então** (Evento É Sobreexcitação)
8. **SE** (I_{dF}/I_{rF} É Alta) **E** (I_{d2} É Baixa) **E** (I_{d5} iÉ Alta) **Então** (Evento É Sobreexcitação)

Estas 8 regras podem ser sumarizadas de acordo com a Figura 4.6. Nesta figura tem-se caracterizadas as respostas para as combinações possíveis das variáveis de entrada, contemplando as oito regras expostas anteriormente.

		I_{d2}	
		Baixa	Alta
I_{d5}	Baixa	Reg	EnS
	Alta	Sbe	EnS

Para I_{dF}/I_{rF} Baixa

		I_{d2}	
		Baixa	Alta
I_{d5}	Baixa	Fln	Ene
	Alta	Sbe	Ene

Para I_{dF}/I_{rF} Alta

Figura 4.6: Síntese das regras do SF modelado.

Coloca-se que o operador utilizado para a composição das inferências foi o operador MAX-MIN, pois este apresenta menor esforço computacional quando comparado aos demais operadores (Zimmermann, 2001). Para o procedimento de *defuzzificação* que informará o valor numérico da saída de cada subsistema *fuzzy*, foi aplicada a técnica do último máximo, que fornece como resposta o maior valor do domínio com máxima pertinência ao conjunto de saída.

Para exemplificar como o SF processa as informações de entrada e fornece os resultados de saída, apresenta-se duas figuras que ilustram o processo para dois conjuntos de entradas distintos. O primeiro conjunto de entradas fornecido ao SF foi: $I_{dF}/I_{rF} = 23$, $I_{d2} = 20$ e $I_{d5} = 10$. Com estas estradas verifica-se por meio da Figura 4.7 que somente quatro regras foram ativadas: 3, 4, 5, 6. Pelas regras, cada variável linguística contribui com as regiões *fuzzy* coloridas em amarelo na composição da saída desta regra. Os valores de saída de cada regra (contribuição de cada regra para formar a variável de saída *fuzzy*) são combinados para formar a variável de saída *fuzzy* que apresenta valor de pertinência máximo no termo linguístico *Energização*. A variável de saída é *defuzzificada*, pelo método do último máximo, fornecendo a saída discreta igual a 2 para o restante do processamento do algoritmo proposto.

A Figura 4.8 ilustra um caso onde todas as regras foram ativadas para um conjunto de entradas fornecido ao SF. Neste caso, as entradas fornecidas ao sistema foram: $I_{dF}/I_{rF} = 17$, $I_{d2} = 12$ e $I_{d5} = 12$. Para estes valores das variáveis de entrada, todas as regras foram ativadas e em cada regra o grau de pertinência de cada termo linguístico é igual a 0,5, correspondendo as regiões coloridas em amarelo. É este o valor da contribuição de cada regra para a composição da variável de saída. Observa-se que, após o procedimento de inferência, a função de pertinência de todos os eventos de saída tem valor igual a 0.5, entretanto, como a *defuzzificação* é feita pela técnica último máximo, o evento indicado é falta interna.

Importa destacar que a concepção do SF apresentado foi baseada em uma implementação do padrão IEC 61131 (IEC, 2000), que na sua parte 7 trata da programação de aplicações de controle *fuzzy* em Controladores Lógicos Programáveis (PLCs). A biblioteca utilizada para esta

Figura 4.7: Exemplo do procedimento de inferência *fuzzy* para entradas que ativaram quatro regras.

implementação foi a FFLL, disponível em (<http://ffll.sourceforge.net>, 2009).

4.1.4 A Classificação Final do Evento Transitório

O último bloco do diagrama apresentado na Figura 4.1 é o de classificação do evento. Neste bloco, são processadas as saídas dos SFs aplicados a cada uma das fases do transformador, para que se tenha uma única indicação do evento ao qual o equipamento está submetido.

Inicialmente, verifica-se em cada uma das fases do transformador analisado, quando da ocorrência de uma falta, se este foi energizado sob falta, conforme ilustra a Figura 4.9. Para isto, verifica-se a saída *fuzzy*, e caso esta seja diferente de 5, o transitório ocorrido é o indicado pelo SF.

Caso a saída do SF seja igual a 5, verifica-se se o transitório corresponde a uma energização sob falta. Esta verificação é realizada observando-se o valor da energia do primeiro detalhe da TW da forma de onda da corrente no secundário do transformador. A energia é calculada de acordo com a Equação (4.16). Caso o valor desta energia seja zero, o transformador foi energizado sob falta interna. No caso da energização sob falta, a saída do classificador recebe

Figura 4.8: Exemplo do procedimento de inferência *fuzzy* para entradas que ativaram todas as regras.

valor igual a seis. Nas demais situações o valor da saída é o mesmo da saída do SF.

$$Energia = \sum_{n=0}^N x_n^2 \quad (4.16)$$

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

Por fim, realiza-se uma análise das saídas do algoritmo aplicados as três fases do transformador. Desta análise conclui-se que o evento transitório ao qual o transformador está submetido é aquele indicado pela saída de maior valor das três fases. Vale lembrar que os possíveis valores para as saídas são:

- 6, para energização sob falta interna;
- 5, para falta interna;
- 4, para sobreexcitação do transformador;
- 3, para energização solidária;
- 2, para energização e

Figura 4.9: Procedimento para classificação final do evento observado.

- 1, para regime permanente.

No capítulo que segue, serão apresentados e comentados os resultados da avaliação do algoritmo proposto.

Capítulo 5

Avaliação do Algoritmo Implementado

O propósito deste capítulo é apresentar os resultados do algoritmo proposto frente às várias situações transitórias comumente experimentadas pelos transformadores de potência. Vale lembrar que o interesse desta aplicação é apontar as situações transitórias em que aparecem correntes diferenciais, uma vez que estas podem afetar a proteção convencional dos transformadores. Vale lembrar que as situações que não apresentarem correntes diferenciais significantes, devem ser classificadas como regime permanente, mesmo quando da observação de elevadas correntes no primário e secundário do transformador.

No desenvolvimento deste capítulo, serão feitas algumas considerações a cerca de todos os casos testados.

5.1 Faltas Internas ao Transformador TR2E

Nesta seção apresentam-se os resultados obtidos pelo algoritmo, quando da aplicação de faltas internas ao transformador TR2E (Figura 3.1). Para estes casos o algoritmo deve apontar ocorrência de falta interna nas análises referentes à TR2E e situação de regime permanente para o transformador que opera em paralelo, TR3E.

5.1.1 Faltas Fase-Terra Internas ao Transformador

A Tabela 5.1 apresenta as situações de falta fase-terra consideradas para esta etapa de teste do algoritmo proposto. Para cada situação de falta aponta-se: a porcentagem do enrolamento secundário envolvida (primeira coluna), o ângulo de fase (segunda coluna), o instante da

ocorrência (aplicação) da situação de falta (terceira coluna), o momento em que o algoritmo passou a detectar a presença da falta (quarta coluna) e o resultado da análise do evento apontado pelo algoritmo (última coluna). Cabe lembrar que os ângulos de inserção das faltas estão variando conforme já fora ilustrado na Figura 3.4.

Tabela 5.1: Análises de TR2E quando da aplicação de faltas internas fase “A”-“terra” no secundário deste transformador.

% Enrolamento	Ang.(°)	Início da falta (s)	Detecção (s)	Saída
80	300	0,3430	0,356	Falta interna
80	45	0,3479	0,358	Falta interna
80	60	0,3486	0,360	Falta interna
50	315	0,3437	0,357	Falta interna
50	330	0,3444	0,358	Falta interna
50	30	0,3472	0,360	Falta interna
30	300	0,3430	0,356	Falta interna
30	15	0,3465	0,359	Falta interna
30	30	0,3472	0,360	Falta interna
10	330	0,3444	0,358	Falta interna
10	15	0,3465	0,359	Falta interna
10	75	0,3493	0,360	Falta interna
5	345	0,3451	0,358	Falta interna
5	45	0,3479	0,360	Falta interna
5	90	0,3499	0,361	Falta interna

Observando a tabela, verifica-se que o algoritmo apontou corretamente a ocorrência de todas as situações avaliadas. Contudo esta indicação teve sempre um pequeno atraso em relação ao instante de inserção da falta no transformador. Em média, o atraso foi de aproximadamente 0,0125 s, correspondendo às 12 primeiras amostras após a aplicação da falta. Neste pequeno período, as amostras foram classificadas como sobreexcitação ou como energização. Isto não foi considerado como um erro, pois é uma característica das situações de falta interna o aparecimento de componentes harmônicos diferentes da fundamental durante um pequeno intervalo de tempo após o início da falta. Para estas situações, o mais importante é a precisão e velocidade com que se percebe a presença de uma falta interna. Desta forma, o algoritmo apresentou um excelente desempenho para estas situações, pois conseguiu perceber a presença de uma situação de falta até 3/4 de ciclo após o início do defeito. A Figura 5.1 ilustra uma saída típica do algoritmo quando da observação de um transformador sob falta interna envolvendo a situação fase-terra.

Vale afirmar que quando ocorre uma das situações de falta interna em TR2E apresentadas na Tabela 5.1, a análise das formas de onda do transformador TR3E aponta que este opera em regime permanente, respondendo como o esperado, uma vez que estas situações não provocam

Figura 5.1: Classificação do evento observado por TR2E durante uma falta interna ocorrida neste transformador.

correntes diferenciais no transformador ligado em paralelo. A Figura 5.2 representa uma saída típica do algoritmo para a análise de um transformador quando ocorre uma falta interna em outro transformador ligado em paralelo a este.

5.1.2 Faltas Internas ao Transformador Envolvendo as Fases “A” e “B”

Os resultados obtidos para os casos de falta interna entre fases foram semelhantes aos obtidos para as situações de faltas fase-terra. Todas as situações de faltas foram corretamente detectadas e classificadas, apresentando, em média, o mesmo atraso que ocorreu quando das situações anteriores. Quanto à classificação das ocorrências no transformador conectado em paralelo ao transformador em falta, todas as situações foram apontadas como regime permanente. Na Tabela 5.2 pode-se verificar os resultados obtidos para as análises referentes ao transformador em falta.

Figura 5.2: Saída do algoritmo aplicado ao transformador TR3E durante uma falta interna ocorrida em TR2E.

5.1.3 Faltas Internas Entre Espiras da Mesma Fase do Transformador

Para as situações de falta entre espiras de uma mesma fase, o algoritmo obteve êxito na maioria das situações. Entretanto, para três situações classificou de forma incorreta a situação a qual o transformador estava submetido. Para as três situações de falta interna envolvendo as espiras a 50% e 10% do enrolamento primário da fase “A” o algoritmo apontou que o transformador operava em regime durante a maior parte da ocorrência. A Figura 5.3 ilustra o comportamento do classificador perante uma destas situações. Para as demais situações observadas no transformador sob falta entre espiras, o algoritmo se comportou da mesma forma que para as situações de falta fase-terra e fase-fase. Quanto a classificação da situação de operação do transformador TR3E durante estas situações de falta entre espiras em TR2E, o algoritmo apontou corretamente, para todos os eventos, que o transformador TR3E operava em regime permanente.

Tabela 5.2: Análises de TR2E quando da aplicação de faltas internas fase-fase.

Lado do transf.	% Enrolamento	Ang. (°)	Início da Falta (s)	Deteção (s)	Saída
Primário	80	300	0,3430	0,356	Falta interna
Primário	80	345	0,3451	0,356	Falta interna
Primário	80	45	0,3479	0,361	Falta interna
Primário	50	285	0,3423	0,354	Falta interna
Primário	50	345	0,3451	0,358	Falta interna
Primário	50	30	0,3472	0,361	Falta interna
Primário	30	285	0,3423	0,353	Falta interna
Primário	30	45	0,3479	0,361	Falta interna
Primário	30	60	0,3486	0,361	Falta interna
Primário	10	300	0,3430	0,356	Falta interna
Primário	10	345	0,3451	0,359	Falta interna
Primário	10	45	0,3479	0,360	Falta interna
Primário	5	330	0,3444	0,358	Falta interna
Primário	5	45	0,3479	0,359	Falta interna
Primário	5	90	0,3499	0,361	Falta interna
Secundário	80	270	0,3417	0,355	Falta interna
Secundário	80	330	0,3444	0,358	Falta interna
Secundário	80	30	0,3472	0,359	Falta interna
Secundário	50	300	0,3430	0,357	Falta interna
Secundário	50	345	0,3451	0,358	Falta interna
Secundário	50	45	0,3479	0,359	Falta interna
Secundário	30	285	0,3423	0,356	Falta interna
Secundário	30	345	0,3451	0,358	Falta interna
Secundário	30	30	0,3472	0,358	Falta interna
Secundário	10	345	0,3451	0,358	Falta interna
Secundário	10	45	0,3479	0,358	Falta interna
Secundário	10	75	0,3493	0,363	Falta interna
Secundário	5	345	0,3451	0,358	Falta interna
Secundário	5	30	0,3472	0,358	Falta interna
Secundário	5	90	0,3499	0,361	Falta interna

5.2 Sobreexcitação dos Transformadores TR2E e TR3E

No que diz respeito à situação de sobreexcitação dos transformadores, o algoritmo respondeu como esperado, classificando corretamente, na maioria dos casos testados, as situações de sobreexcitação em ambos os transformadores analisados. Os erros que o algoritmo cometeu ocorreram para situações em que o transformador operava com uma tensão de até 125% da tensão nominal do sistema. Percebeu-se que quando o transformador é submetido a sobreensões menos severas, não ocorrem correntes diferenciais significativas. Por isto, nas situações em que a tensão é menor que 125% da tensão nominal, o algoritmo apontou que o transformador analisado operava em regime permanente, cometendo um erro esperado diante das formas de ondas que lhe foram apresentadas. A Figura 5.4 ilustra a resposta do algoritmo a uma destas situações em que o mesmo falhou no diagnóstico. Nesta figura é possível perceber que

Tabela 5.3: Análises de TR2E quando da aplicação de faltas internas entre espitas.

Lado do transf.	% Enrolamento	Ang. (°)	Início da falta (s)	Deteção (s)	Saída
Primário	80 e 50	300	0,3430	0,356	Falta interna
Primário	80 e 50	315	0,3437	0,357	Falta interna
Primário	80 e 50	30	0,3472	0,360	Falta interna
Primário	50 e 30	315	0,3437	0,357	Falta interna
Primário	50 e 30	330	0,3444	0,358	Falta interna
Primário	50 e 30	45	0,3479	0,360	Falta interna
Primário	30 e 10	330	0,3444	0,358	Falta interna
Primário	30 e 10	60	0,3486	0,360	Falta interna
Primário	30 e 10	75	0,3493	0,360	Falta interna
Primário	50 e 10	315	0,3437	0,356	Regime
Primário	50 e 10	15	0,3465	0,358	Regime
Primário	50 e 10	60	0,3486	0,360	Regime
Primário	10 e 5	300	0,3430	0,356	Falta interna
Primário	10 e 5	345	0,3451	0,358	Falta interna
Primário	10 e 5	45	0,3479	0,360	Falta interna
Primário	30 e 5	315	0,3437	0,357	Falta interna
Primário	30 e 5	345	0,3451	0,359	Falta interna
Primário	30 e 5	60	0,3486	0,360	Falta interna
Secundário	80 e 50	300	0,3430	0,356	Falta interna
Secundário	80 e 50	15	0,3465	0,360	Falta interna
Secundário	80 e 50	30	0,3472	0,360	Falta interna
Secundário	50 e 30	315	0,3437	0,357	Falta interna
Secundário	50 e 30	15	0,3465	0,360	Falta interna
Secundário	50 e 30	60	0,3486	0,360	Falta interna
Secundário	30 e 10	300	0,3430	0,356	Falta interna
Secundário	30 e 10	45	0,3479	0,356	Falta interna
Secundário	30 e 10	90	0,3499	0,361	Falta interna
Secundário	50 e 10	300	0,3430	0,356	Falta interna
Secundário	50 e 10	345	0,3451	0,357	Falta interna
Secundário	50 e 10	60	0,3486	0,360	Falta interna

praticamente não ocorreram alterações nas formas de onda do primário e do secundário do transformador, uma vez que elas possuem um comportamento praticamente senoidal.

Todavia, para situações em que a tensão de alimentação do sistema é superior a 125% da nominal, o algoritmo indicou que o transformador operava sobreexcitado. O algoritmo apontou esta situação com um atraso de 0,016 s. O mesmo é justificado pela necessidade de se completar uma janela de dados com 16 amostras, para que a lógica implementada comece a atuar. Em todas as situações testadas em que a tensão era superior a 125% da nominal, houve a caracterização de correntes diferenciais significativas, com conteúdo espectral caracterizado pela presença do quinto harmônico. A Figura 5.5 ilustra as correntes detectadas em uma destas situações de sobreexcitação corretamente classificada, bem como a resposta do algoritmo perante tais correntes.

A Tabela 5.4 contém todos os casos testados para a situação de sobreexcitação dos transfor-

Figura 5.3: Classificação do transitório observado em TR2E durante uma falta interna envolvendo as espiras a 50% e 10% do enrolamento primário da fase “A” aplicada neste transformador com ângulo de falta de 60° .

madores TR2E e TR3E.

5.3 Energização do Transformador TR2E

Para verificar como o algoritmo proposto se comportava perante as situações de energização simuladas, foram selecionadas cinco destas situações. A Tabela 5.5 mostra os resultados obtidos pelo algoritmo proposto para cada uma das situações de energização consideradas.

Pelos dados apresentados na Tabela 5.5 percebe-se que o algoritmo foi capaz de detectar e classificar corretamente as situações de energização. Em média, o tempo decorrido entre o instante de fechamento da chave para a energização do transformador e o momento em que o algoritmo passou a identificar a energização foi de 0,003 s. Após este intervalo de tempo, o algoritmo detecta uma corrente diferencial considerável, a ponto de fazer operar os dispositivos de proteção, caracterizada pela forte presença do segundo harmônico. O comportamento do algoritmo perante as situações de energização pode ser ilustrado pela Figura 5.6.

Figura 5.4: Classificação do transitório observado em TR2E durante uma sobreexcitação em virtude de uma elevação da tensão à 118% da nominal.

5.3.1 Energização Solidária do Transformador TR3E

Para cada uma das situações em que o transformador TR2E foi energizado, observou-se o comportamento das correntes no transformador TR3E, que estava operando em paralelo no momento da energização. A Tabela 5.6 apresenta os resultados obtidos pela aplicação do algoritmo na análise de TR3E durante as situações de energização de TR2E.

Pelo exposto na tabela, verifica-se que realmente a energização de um transformador afeta as formas de onda em outro equipamento que opera em paralelo. Todavia, esta alteração nem sempre provoca o surgimento de correntes diferenciais com amplitudes significantes. Neste sentido, vale afirmar que o algoritmo não foi capaz de identificar a ocorrência da energização solidária quando do fechamento da chave para a energização com ângulos de 300° e de 90° . Nestas situações não houve a caracterização de correntes diferenciais no transformador observado, em virtude da energização do transformador que opera em paralelo. A resposta apresentada pelo algoritmo sugere que quando a energização ocorre com o fechamento das chaves em um ângulo próximos a 270° ou a 90° , as deformações nas formas de ondas das correntes trifásicas dos equipamentos conectados em paralelo é menor. Na Figura 5.7 está ilustrada uma situação

Figura 5.5: Classificação do transitório observado em TR2E durante uma sobreexcitação em virtude de uma elevação da tensão à 128% da nominal.

em que o algoritmo proposto não foi capaz de detectar a energização solidária.

A medida que o ângulo de energização do transformador se aproxima de 0° , aumenta a influência desta operação sobre as correntes observadas no transformador conectado em paralelo ao energizado. Nestas situações aparecem correntes diferenciais com valores consideráveis contendo uma quantidade significativa de conteúdo harmônico, principalmente harmônicos de segunda ordem. Para estes casos o algoritmo conseguiu detectar os eventos de energização solidária, entretanto, este demorou em média 0,086s (5,15 ciclos tomando como base a frequência fundamental) para perceber o evento. Constatou-se também, que a corrente diferencial caracterizada no transformador ligado em paralelo ao energizado, aumenta significativamente ao longo do procedimento de energização. Isto explica a demora do algoritmo em detectar a energização solidária, pois esta somente será detectada pelo algoritmo quando caracterizada por correntes diferenciais com valores capazes de ativar as regras *fuzzy*. Na Figura 5.8 tem-se uma amostra de como são as correntes durante as situações passíveis de detecção pelo algoritmo proposto, bem como a resposta do algoritmo para tais situações.

Pelos testes realizados, verificou-se que as correntes diferenciais que surgem durante a situação caracterizada pela energização solidária são bem menores que as observadas durante

Tabela 5.4: Análises de TR2E e TR3E quando de uma sobreexcitação.

Transf. Observado	% Tensão Nominal	Início da Sobreexcitação (s)	Deteção (s)	Saída
TR2E	112	0	-	Regime
TR2E	118	0	-	Regime
TR2E	122	0	-	Regime
TR2E	125	0	0,016	Sobreexcitação
TR2E	128	0	0,016	Sobreexcitação
TR2E	130	0	0,016	Sobreexcitação
TR2E	135	0	0,016	Sobreexcitação
TR2E	140	0	0,016	Sobreexcitação
TR2E	141	0	0,016	Sobreexcitação
TR2E	144	0	0,016	Sobreexcitação
TR2E	150	0	0,016	Sobreexcitação
TR2E	155	0	0,016	Sobreexcitação
TR2E	158	0	0,016	Sobreexcitação
TR2E	164	0	0,016	Sobreexcitação
TR2E	139	0	0,016	Sobreexcitação
TR3E	112	0	-	Regime
TR3E	118	0	-	Regime
TR3E	122	0	-	Regime
TR3E	125	0	0,016	Sobreexcitação
TR3E	128	0	0,016	Sobreexcitação
TR3E	130	0	0,016	Sobreexcitação
TR3E	135	0	0,016	Sobreexcitação
TR3E	140	0	0,016	Sobreexcitação
TR3E	141	0	0,016	Sobreexcitação
TR3E	144	0	0,016	Sobreexcitação
TR3E	150	0	0,016	Sobreexcitação
TR3E	155	0	0,016	Sobreexcitação
TR3E	158	0	0,016	Sobreexcitação
TR3E	164	0	0,016	Sobreexcitação
TR3E	139	0	0,016	Sobreexcitação

uma falta ou uma energização. Entretanto, assim como nas situações de energização, é marcante a presença de harmônicos pares nestas formas de onda.

5.4 Energização do Transformador TR2E Sob Falta Interna

Foram também apreciadas as situações de energização, nas quais o transformador ainda estava sob falta quando da energização. Para estas situações o SF deveria responder com a indicação de uma falta interna, pois como a corrente de falta é muito alta, ela vai se sobressair aos componentes harmônicos que surgem devido a energização. Após a indicação da falta pelo SF, percebe-se que esta ocorre ao mesmo tempo que a energização, verificando-se a energia do detalhe de primeira ordem da TW das correntes do secundário do transformador, como explicado anteriormente. Na Tabela 5.7 estão apontadas as situações de energização sob falta

Tabela 5.5: Análises de TR2E durante procedimentos de energização.

Ang. Ener. (°)	Início da energização (s)	Setecção (s)	Saída
300	0,3430	0,346	Energização
345	0,3451	0,349	Energização
15	0,3465	0,350	Energização
60	0,3486	0,350	Energização
90	0,3499	0,353	Energização

Figura 5.6: Resposta do algoritmo durante uma situação de energização de TR2E.

interna no primário que foram apresentadas ao algoritmo. Já na Tabela 5.8, lista-se as situações de energização sob falta interna no secundário do transformador. Como pode ser visto nestas tabelas, o algoritmo indicou corretamente que o transformador estava submetido a uma situação de defeito interno durante o procedimento de energização. Na Figura 5.9 representa-se as formas de onda durante uma situação de energização sob falta acompanhadas da resposta do algoritmo para estas.

Observando as tabelas percebe-se que o algoritmo apontou corretamente que o transformador estava sendo energizado sob falta para todas as situações. Entretanto, assim como nas situações de falta interna, o tempo de início da detecção fica comprometido em virtude do conteúdo harmônico caracterizado quando do início de uma falta. Para as situações de energização sob falta, o algoritmo demora um pouco mais a responder adequadamente por causa

Tabela 5.6: Análises de TR3E durante procedimentos de energização de TR2E.

Ang. da Ener. de TR2E (°)	Início da Ener. de TR2E (s)	Deteção (s)	Saída p/ TR3E
300	0,3430	-	Regime
345	0,3451	0,431	Energização solidária
15	0,3465	0,417	Energização solidária
60	0,3486	0,450	Energização solidária
90	0,3450	-	Regime

Figura 5.7: Resposta do algoritmo durante uma situação de energização de TR2E em que não foi possível a detecção da energização solidária do transformador TR3E.

dos harmônicos pares provocados pela energização. O algoritmo passa a indicar corretamente a situação de energização sob falta interna, em média, após 0,016 s do seu início. Um exemplo desta situação é apresentado na Figura 5.9.

5.4.1 Efeito do Paralelismo em TR3E Durante a Energização do Transformador TR2E Sob Falta Interna

Quando o transformador TR2E é energizado sob condição de falta interna, observou-se a influência deste evento em TR3E. Como o evento principal que ocorre em TR2E é a falta interna, o ideal seria que em TR3E não ocorressem correntes diferenciais. Desta forma o esperado era

Figura 5.8: Resposta do algoritmo durante uma situação de energização de TR2E em que ficou caracterizada a energização solidária do transformador TR3E.

que o algoritmo proposto, quando aplicado para analisar as formas de onda verificadas em TR3E, respondesse a esta situação da mesma forma que respondeu para a ocorrência de falta interna em TR2E. Verificou-se isto para todas as situações de energização de TR2E sob falta interna no primário, nas quais o algoritmo apontou situação de regime permanente em TR3E. Entretanto, quando a energização ocorreu com falta interna no secundário do transformador, o algoritmo passou a classificar os transitórios em TR3E como energização solidária em diversas situações, conforme pode ser visto na Tabela 5.9.

Percebe-se avaliando a Tabela 5.9 que o comportamento do classificador nas situações apontadas é semelhante ao apresentado na Tabela 5.6, quando ele classifica uma real energização solidária, provocada por uma energização do transformador conectado em paralelo. A energização solidária só é percebida quando o ângulo da energização do transformador em paralelo está entre 315° e 45° . Quando a energização ocorre com outro ângulo qualquer, esta situação não é capaz de provocar correntes diferenciais no transformador conectado em paralelo. A Figura 5.10 apresenta uma resposta do algoritmo quando submetido a energização com um ângulo de 30° , sob falta interna no secundário.

Como já foi colocado, apontar a situação de regime é a resposta esperada na análise das

Tabela 5.7: Análises de TR2E quando da energização de um transformador sob falta interna no primário.

Tipo de Falta	% Ener.	Ang. Ener. (°)	Início da Ener. (s)	Detecção (s)	Saída
Fase-Fase	80	315	0,3437	0,356	Ene. sob falta
Fase-Fase	80	330	0,3444	0,358	Ene. sob falta
Fase-Fase	80	15	0,3465	0,360	Ene. sob falta
Fase-Fase	50	270	0,3417	0,357	Ene. sob falta
Fase-Fase	50	15	0,3465	0,358	Ene. sob falta
Fase-Fase	50	60	0,3486	0,360	Ene. sob falta
Fase-Fase	30	300	0,3430	0,356	Ene. sob falta
Fase-Fase	30	00	0,3458	0,359	Ene. sob falta
Fase-Fase	30	45	0,3479	0,360	Ene. sob falta
Fase-Fase	10	330	0,3444	0,358	Ene. sob falta
Fase-Fase	10	15	0,3465	0,359	Ene. sob falta
Fase-Fase	10	75	0,3493	0,360	Ene. sob falta
Fase-Fase	5	300	0,3430	0,361	Ene. sob falta
Fase-Fase	5	00	0,3458	0,361	Ene. sob falta
Fase-Fase	5	75	0,3493	0,365	Ene. sob falta
Entre espiras	80-50	315	0,3437	0,356	Ene. sob falta
Entre espiras	80-50	30	0,3472	0,358	Ene. sob falta
Entre espiras	80-50	45	0,3479	0,360	Ene. sob falta
Entre espiras	50-30	285	0,3423	0,357	Ene. sob falta
Entre espiras	50-30	300	0,3430	0,358	Ene. sob falta
Entre espiras	50-30	30	0,3472	0,360	Ene. sob falta
Entre espiras	30-10	285	0,3423	0,356	Ene. sob falta
Entre espiras	30-10	30	0,3472	0,359	Ene. sob falta
Entre espiras	30-10	90	0,3499	0,360	Ene. sob falta
Entre espiras	50-10	270	0,3417	0,358	Ene. sob falta
Entre espiras	50-10	0	0,3458	0,359	Ene. sob falta
Entre espiras	50-10	45	0,3479	0,360	Ene. sob falta

formas de onda da corrente em um transformador que opera em paralelo com outro que é energizado sob falta. Entretanto para situações em que a falta interna durante a energização ocorreu no secundário a resposta obtida pelo algoritmo foi semelhante a resposta obtida quando ocorre uma energização do transformador em paralelo. A explicação para este erro na classificação reside no fato de que durante a energização com falta no secundário, a corrente chega a ser refletida no lado secundário do transformador, caracterizando o processo de energização, e só então passa a alimentar a falta. Desta forma, ocorre a saturação do núcleo do transformador, da mesma forma que ocorre durante um procedimento de energização sem falta. Então, as distorções geradas durante este procedimento de *inrush* são refletidos para o transformador que opera em paralelo com o que é energizado sob falta, provocando o surgimento de correntes diferenciais, da mesma forma que o provocado durante uma energização.

Figura 5.9: Resposta do algoritmo durante uma situação de energização de TR2E sob falta interna.

Figura 5.10: Resposta do algoritmo para análises de TR3E durante uma situação de energização de TR2E sob falta interna no secundário.

Tabela 5.8: Análises de TR2E quando da energização de um transformador sob falta interna no secundário.

Tipo de Falta	% Enr.	Ang. Ene. (°)	Início da Ene. (s)	Deteção (s)	Saída
Fase-Terra	80	270	0,3417	0,358	Ene. sob falta
Fase-Terra	80	345	0,3451	0,362	Ene. sob falta
Fase-Terra	80	45	0,3479	0,363	Ene. sob falta
Fase-Terra	50	285	0,3423	0,360	Ene. sob falta
Fase-Terra	50	330	0,3444	0,361	Ene. sob falta
Fase-Terra	50	30	0,3472	0,360	Ene. sob falta
Fase-Terra	30	270	0,3417	0,356	Ene. sob falta
Fase-Terra	30	0	0,3458	0,361	Ene. sob falta
Fase-Terra	30	60	0,3486	0,365	Ene. sob falta
Fase-Terra	10	315	0,3437	0,361	Ene. sob falta
Fase-Terra	10	15	0,3465	0,360	Ene. sob falta
Fase-Terra	10	30	0,3472	0,360	Ene. sob falta
Fase-Terra	5	315	0,3437	0,361	Ene. sob falta
Fase-Terra	5	15	0,3465	0,361	Ene. sob falta
Fase-Terra	5	75	0,3493	0,365	Ene. sob falta
Fase-Fase	80	315	0,3470	0,360	Ene. sob falta
Fase-Fase	80	330	0,3444	0,361	Ene. sob falta
Fase-Fase	80	15	0,3465	0,360	Ene. sob falta
Fase-Fase	50	270	0,3417	0,359	Ene. sob falta
Fase-Fase	50	15	0,3465	0,361	Ene. sob falta
Fase-Fase	50	60	0,3486	0,364	Ene. sob falta
Fase-Fase	30	300	0,3430	0,360	Ene. sob falta
Fase-Fase	30	0	0,3458	0,360	Ene. sob falta
Fase-Fase	30	45	0,3479	0,364	Ene. sob falta
Fase-Fase	10	330	0,3444	0,361	Ene. sob falta
Fase-Fase	10	15	0,3465	0,359	Ene. sob falta
Fase-Fase	10	75	0,3493	0,366	Ene. sob falta
Fase-Fase	5	300	0,3430	0,359	Ene. sob falta
Fase-Fase	5	0	0,3458	0,361	Ene. sob falta
Fase-Fase	5	75	0,3493	0,365	Ene. sob falta
Entre espiras	80-50	315	0,3437	0,361	Ene. sob falta
Entre espiras	80-50	30	0,3472	0,361	Ene. sob falta
Entre espiras	80-50	45	0,3479	0,360	Ene. sob falta
Entre espiras	50-30	285	0,3423	0,359	Ene. sob falta
Entre espiras	50-30	300	0,3430	0,360	Ene. sob falta
Entre espiras	50-30	30	0,3472	0,361	Ene. sob falta
Entre espiras	30-10	285	0,3423	0,359	Ene. sob falta
Entre espiras	30-10	30	0,3472	0,362	Ene. sob falta
Entre espiras	30-10	90	0,3450	0,367	Ene. sob falta
Entre espiras	50-10	270	0,3417	0,359	Ene. sob falta
Entre espiras	50-10	0	0,3458	0,361	Ene. sob falta
Entre espiras	50-10	45	0,3479	0,361	Ene. sob falta

Tabela 5.9: Análises de TR3E durante o procedimento de energização de TR2E sob falta interna no secundário do transformador.

T. Falta em TR2E	% Ener.	Ang. Ener. TR2E (°)	In. da Ener. (s)	Det. (s) em TR3E	Saída p/ TR3E
Fase-Terra	80	270	0,3417	-	Regime
Fase-Terra	80	345	0,3451	0,464	Ene. solidária
Fase-Terra	80	45	0,3479	-	Regime
Fase-Terra	50	285	0,3423	-	Regime
Fase-Terra	50	330	0,3444	0,514	Ene. solidária
Fase-Terra	50	30	0,3472	-	Regime
Fase-Terra	30	270	0,3417	-	Regime
Fase-Terra	30	0	0,3458	0,398	Ene. solidária
Fase-Terra	30	60	0,3486	-	Regime
Fase-Terra	10	315	0,3437	-	Regime
Fase-Terra	10	15	0,3465	0,397	Ene. solidária
Fase-Terra	10	30	0,3472	0,414	Ene. solidária
Fase-Terra	5	315	0,3437	-	Regime
Fase-Terra	5	15	0,3465	0,361	Ene. solidária
Fase-Terra	5	75	0,3493	-	Regime
Fase-Fase	80	315	0,3470	0,414	Ene. solidária
Fase-Fase	80	330	0,3444	0,397	Ene. solidária
Fase-Fase	80	15	0,3465	0,413	Ene. solidária
Fase-Fase	50	270	0,3417	-	Regime
Fase-Fase	50	15	0,3465	0,397	Ene. solidária
Fase-Fase	50	60	0,3486	-	Regime
Fase-Fase	30	300	0,3430	-	Regime
Fase-Fase	30	0	0,3458	0,380	Ene. solidária
Fase-Fase	30	45	0,3479	-	Regime
Fase-Fase	10	330	0,3444	0,364	Ene. solidária
Fase-Fase	10	15	0,3465	0,390	Ene. solidária
Fase-Fase	10	75	0,3493	0,396	Ene. solidária
Fase-Fase	5	300	0,3430	-	Regime
Fase-Fase	5	0	0,3458	0,380	Ene. solidária
Fase-Fase	5	75	0,3493	-	Regime
Entre espiras	80-50	315	0,3437	0,564	Ene. solidária
Entre espiras	80-50	30	0,3472	0,414	Ene. solidária
Entre espiras	80-50	45	0,3479	0,463	Ene. solidária
Entre espiras	50-30	285	0,3423	-	Regime
Entre espiras	50-30	300	0,3430	-	Regime
Entre espiras	50-30	30	0,3472	0,414	Ene. solidária
Entre espiras	30-10	285	0,3423	-	Regime
Entre espiras	30-10	30	0,3472	0,415	Ene. solidária
Entre espiras	30-10	90	0,3450	-	Regime
Entre espiras	50-10	270	0,3417	-	Regime
Entre espiras	50-10	0	0,3458	0,396	Ene. solidária
Entre espiras	50-10	45	0,3479	0,450	Ene. solidária

Capítulo 6

Observações Finais

Nesta pesquisa, foi proposto a implementação de um sistema inteligente, com a obtenção das variáveis de entrada, através da TWP, para a detecção e classificação de situações transitórias não desejáveis à operação de transformadores de potência.

Pelo que foi reportado, esta análise permitiu um melhor entendimento das situações presenciadas em um transformador de potência, o que possibilitará um melhor ajuste dos dispositivos de proteção alocados junto a este equipamento. Outra possibilidade evidenciada pela metodologia proposta é a de se analisar as influências da condição sob a qual o transformador está operando no contexto da qualidade da energia do sistema elétrico como um todo. Por estes dois pontos, procurou-se então justificar o interesse pelo tema em estudo, uma vez que estes são de grande importância para a correta operação do SEP.

Para possibilitar estes estudos foram empregadas duas técnicas que vem sendo bastante difundidas em aplicações sobre SEPs nos últimos anos: a TW e a LF. O interesse pela aplicação da TW surge por esta ser uma ferramenta capaz de fornecer informações importantes, tanto no domínio do tempo quanto no domínio da frequência. Neste trabalho, optou-se por se utilizar uma generalização desta ferramenta, a TWP, visto que esta possibilita uma melhor resolução no domínio da frequência. Quanto à LF, justifica-se o interesse por esta ferramenta dada a possibilidade de se trabalhar com informações imprecisas e incertas, como as que podem surgir no problema aqui apresentado.

Vale lembrar que a validação do algoritmo proposto foi realizada através de dados obtidos da simulação de um SEP via o *software* ATP, na qual destaca-se a simulação de transformadores de potência e do paralelismo entre estes elementos, com a conseqüente análise dos mesmos

em regime e em condições transitórias. Na implementação realizada, foram caracterizadas situações de falta interna ao transformador, sobreexcitação, de energização do transformador e de energização sob falta interna. As situações simuladas foram analisadas tanto no transformador onde foram fisicamente caracterizadas, quanto no transformador que operava em paralelo com este, possibilitando a investigação da influência dos eventos decorrentes do paralelismo.

Dentre as inovações desta pesquisa, ressalta-se o estudo sobre o paralelismo entre transformadores, permitindo a caracterização, a compreensão e o estudo da situação de *sympathetic inrush* e suas consequências no correto e desejado funcionamento do SEP.

A utilização do algoritmo proposto para a detecção dos eventos associados com a proteção do transformador mostrou-se bastante eficiente, já que este possibilitou uma boa sensibilidade aos eventos e indicou com precisão o início dos transitórios avaliados. Exceção é feita aos eventos decorrentes do paralelismo entre os transformadores, que nem sempre foram detectados, ou foram detectados com um atraso considerável. Verificou-se que a influência dos fenômenos oriundos do paralelismo depende do ângulo de inserção das situações no transformador. Em decorrência deste ângulo de inserção das situações em um transformador, o dispositivo que opera em paralelo pode ser mais ou menos afetado.

Quanto a classificação das situações evidenciadas, a abordagem aqui proposta se mostrou eficiente, indicando corretamente a grande maioria das situações analisadas com um pequeno atraso, em média menor que um ciclo, desde sua detecção até a correta indicação da ocorrência. Entretanto, algumas das situações foram classificadas de forma equivocada, o que indica a necessidade de melhorias e refinamentos na abordagem proposta.

Dentre as possibilidades de continuidade desta pesquisa, pode-se destacar:

- Ampliar os estudos referentes às situações de paralelismo, em especial às de energização solidária e às provocadas por uma energização acompanhada por uma falta interna;
- Implementação da técnica proposta em hardware;
- Utilizar a dimensão fractal das formas de onda de corrente para distinguir entre os eventos caracterizados;
- A utilização de outras técnicas inteligentes, como RNAs, ou de sistemas híbridos para classificar os eventos observados junto aos transformadores;
- Aplicar técnicas de inteligência artificial para identificar a saturação dos TCs, uma vez

que esta situação pode interferir no desempenho do algoritmo proposto;

- Estudar e propor uma metodologia para recuperar as formas de onda originais a partir de formas de onda fornecidas por um TC saturado;
- Realizar um estudo comparativo entre as outras técnicas inteligentes desenvolvidas e a proposta neste trabalho;
- Comparar os resultados destas técnicas com os obtidos por relés diferenciais, a fim de verificar se este opera ou bloqueia sua operação perante as mais diversas situações evidenciadas;
- Acrescentar transdutores ao longo dos alimentadores e das linhas de transmissão modeladas a fim de medir os valores de tensão e corrente nestes pontos e realizar estudos de QEE relacionados com as situações às quais os transformadores foram submetidos;
- Desenvolver um classificador para fenômenos de QEE capaz de detectar o surgimento destes e de associar cada fenômeno detectado com uma possível condição de operação do transformador.

Para finalizar, vale colocar que esta pesquisa, até o momento, resultou na participação e publicação de três artigos nos seguintes eventos técnico-científicos:

- no Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, 2008 (Branco *et al.*, 2008) e
- no XVII Congresso Brasileiro de Automática, 2008 (Rodrigues *et al.*, 2008; Branco *et al.*, 2008).

Referências Bibliográficas

- Addison, P. (2002). *The Illustrated Wavelet Transform Handbook: Introductory Theory and Applications in Science, Engineering, Medicine and Finance*. Institute of Physics Publishing.
- ATP (1987). *Alternative Transients Program - Rule Book*. Leuven EMTP Center (LEC).
- Bansal, R. (2003). Bibliography on the fuzzy set theory applications in power systems(1994-2001). *IEEE Transactions on Power Systems* 18(4), 1291–1299.
- Baran, M. e J. Kim (2006). A Classifier for Distribution Feeder Overcurrent Analysis. *Power Delivery, IEEE Transactions on* 21(1), 456–462.
- Barbosa, D. (2007). Estimação da Frequência em Sistemas Elétricos de Potência Através de Filtragem Adaptativa. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- Barbosa, D., M. da Silva, A. P. Bernardes, D. V. Coury, e M. Oleskovicz (2006). Lógica fuzzy aplicada à proteção de transformadores. In *Simpósio Brasileiro de Sistemas de Energia*, Campina Grande.
- Barbosa, D., R. M. Monaro, D. V. Coury, e M. Oleskovicz (2008). A Modified Least Mean Square Algorithm for Adaptive Frequency Estimation in Power Systems. In *2008 PES General Meeting*, Pittsburgh.
- Barros, J. e R. Diego (2006). Application of the wavelet-packet transform to the estimation of harmonic groups in current and voltage waveforms. *Power Delivery, IEEE Transactions on* 21(1), 533–535.
- Bernardes, A. P. (2006). Esquema Completo de Proteção Diferencial de Transformadores para Testes em um Relé Digital. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

- Branco, H. M. G. C., D. Barbosa, M. Oleskovicz, e D. V. Coury (2008). Um Classificador Híbrido para Análise das Condições de Operação dos Transformadores de Potência. In *XVII Congresso Brasileiro de Automática*.
- Branco, H. M. G. C., M. Oleskovicz, E. C. Segatto, e D. V. Coury (2008). Um Classificador Inteligente para Análise das Sobrecorrentes em Transformadores em um Sistema de Distribuição de Energia. In *Simpósio Brasileiro de Sistemas de Energia*, Belo Horizonte.
- Bronzeado, H. e R. Yacamini (1995). Phenomenon of Sympathetic Interaction Between Transformers Caused by Inrush Transients. *IEE Proceedings on Science, Measurement and Technology*, 142(4), 323–329.
- Chacon, M., J. Duran, e L. Santiesteban (2007). A Wavelet-Fuzzy Logic Based System to Detect and Identify Electric Power Disturbances. In *Computational Intelligence in Image and Signal Processing, 2007. CIISP 2007. IEEE Symposium on*, pp. 52–57.
- Chuanli, Z., H. Yizhuang, M. Xiaoxu, L. Wenzhe, e W. GuoXing. A new approach to detect transformer inrush current by applying wavelet transform.
- Coury, D. V., M. Oleskovicz, e R. Giovanini (2007). *Proteção Digital de Sistemas Elétricos de potência: Dos Relés Eletromecânicos aos Microprocessados Inteligentes*. Universidade de São Paulo - Escola de Engenharia de São Carlos.
- Delshad, M. e B. Fani (2007). A new method for discriminating between internal faults and inrush current conditions in power transformers based on neuro fuzzy. *Power Engineering, Energy and Electrical Drives, 2007. POWERENG 2007. International Conference on*, 731–735.
- Dugan, R. C., S. Santoso, M. F. McGranaghan, e H. W. Beaty (2003). *Electrical Power Systems Quality*. McGraw-Hill Professional.
- El Safty, S., S. Gharieb, A. El Latif Badr, e M. Mansour (2006). A wavelet fuzzy expert technique for classification of power transformer transients. *Power System Technology, 2006. PowerCon 2006. International Conference on*, 1–5.
- Eldin, E. (2003). A new algorithm for the classification of different transient phenomena in power transformers combining wavelet transform and fuzzy logic. *Proceedings of the IEEE Midwest Symposium on Circuits and Systems* 46(3), 1116.

-
- Faiz, J. e S. Lotfi-Fard (2006). A novel wavelet-based algorithm for discrimination of internal faults from magnetizing inrush currents in power transformers. *IEEE transactions on power delivery* 21(4), 1989–1996.
- FARIA, R. R. A. (1997). Aplicação de wavelets na análise de gestos musicais em timbres de instrumentos acústicos tradicionais. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo.
- Fialho, Á. (2007). Exploração de relações entre as técnicas nebulosas e evolutivas da inteligência computacional. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo.
- Gibelli, G. (2009). Resposta Dinâmica dos Motores de Indução Trifásicos a Afundamentos de Tensão na Rede de Alimentação. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- Hamid, E., Z.-I. Kawasaki, e R. Mardiana (2001). Wavelet packet transform for rms and power measurements. In *Power Engineering Society Summer Meeting, 2001. IEEE*, Volume 2, pp. 1243–1245vol.2.
- Horowitz, S. H. e A. G. Phadke (1995). *Power System Relaying* (2^a ed.). New York: John Wiley e Sons Inc.
- <http://ffll.sourceforge.net> (acessado em 15/06/2009). Free fuzzy logic library.
- IEC (2000). Programmable controllers - part 7: Fuzzy control programming. *IEC Std 61131-7*.
- Jemse, A. e A. C. Harb (2000). *A Ripples in Mathematics: The Discrete Wavelet Transform*. New York: Springer-Verlag.
- Jiping, L., C. Ying, Y. Xue, e W. Li (2005). An approach to power transformer protection based on wavelet transform. In *Power Engineering Conference, 2005. IPEC 2005. The 7th International*, pp. 1–472.
- Kanitpanyacharoean, W. e S. Premrudeepreechacharn (2004). Power quality problem classification using wavelet transformation and artificial neural networks. *Power Systems Conference and Exposition, 2004. IEEE PES*, 1496–1501.
- Kezunovic, M. (2000). Intelligent systems in protection engineering. *Power System Technology, 2000. Proceedings. PowerCon 2000. International Conference on 2*.
- Kezunovic, M. e Y. Liao (2002). A novel software implementation concept for power quality study. *Power Delivery, IEEE Transactions on* 17(2), 544–549.

- Khorashadi-Zadeh, H. e M. Sanaye-Pasand (2004). Power transformer differential protection scheme based on wavelet transform and artificial neural network algorithms. *Universities Power Engineering Conference, 2004. UPEC 2004. 39th International 2*.
- Kindermann, G. (2006). *Proteção de Sistemas Elétricos de Potência* (1ª ed.), Volume 2. Florianópolis: edição do autor.
- Lee, C., Y. Wang, e W. Huang (2000). A literature survey of wavelets in power engineering applications. *Proc. Natl. Sci. Counc. ROC (A)* 24(4), 249–258.
- Madisetti, V. e D. Williams (1998). *The Digital Signal Processing Handbook*. CRC Press.
- Mao, P. e R. Aggarwal (2000). A wavelet transform based decision making logic method for discrimination between internal faults and inrush currents in power transformers. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems* 22(6), 389–395.
- Mao, P. e R. Aggarwal (2001). A novel approach to the classification of the transient phenomenon in power transformers using combined wavelet transform and neural network. *Power Delivery, IEEE Transactions on* 16(4), 654–660.
- Mendel, J. (1995). Fuzzy logic systems for engineering: a tutorial. *Proceedings of the IEEE* 83(3), 345–377.
- Mitra, S. (1998). *Digital signal processing: a computer-based approach*. McGraw-Hill New York.
- Negnevitsky, M. e M. Ringrose (2005). A neuro-fuzzy system for recognition of power quality disturbances. In *Power Engineering Society General Meeting, 2005. IEEE*, pp. 2295–2300 Vol.3.
- Oleskovicz, M. (2004). *Apostila - Qualidade da Energia*. Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia Elétrica.
- Oliveira, J. C., J. R. Cogo, e J. P. G. Abreu (1984). *Transformadores: Teoria e Ensaios*. Edgard Blücher Ltda.
- Pihler, J., B. Grear, e D. Dolinar (1997). Improved operation of power transformer protection using artificial neural network. *IEEE Transactions on Power Delivery* 12(3), 1128 – 1136.
- P.S.R.C. (2008). IEEE Guide for Protecting Power Transformers. *IEEE Std C37.91-2008 (Revision of IEEE Std C37.91-2000)*, c1–139.

-
- Rodrigues, L. C. P., H. M. G. C. Branco, E. Biasotto, M. Oleskovicz, e D. V. Coury (2008). Uma análise automática das variações de tensão de curta e de longa duração associadas à qualidade da energia elétrica dispondo da transformada wavelet. In *XVII Congresso Brasileiro de Automática*.
- Saldana, C., G. Calzolari, e G. Cerecetto (2006). Atp modelling and field tests of the ac voltage regulator in the palmar hydroelectric power plant. *Electric Power Systems Research* 76(8), 681–687.
- Saleh, S. e M. Rahman (2005). Modeling and protection of a three-phase power transformer using wavelet packet transform. *Power Delivery, IEEE Transactions on* 20(2), 1273–1282.
- Santoso, S., W. Grady, E. Powers, J. Lamoree, e S. Bhatt (2000). Characterization of distribution power quality events with fourier and wavelet transforms. *Power Delivery, IEEE Transactions on* 15(1), 247–254.
- Segatto, E. C. (2005). *Relé Diferencial para Transformadores de potência Utilizando Ferramentas Inteligentes*. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- Sengül, M., B. Alboyaci, S. Öztürk, e H. Cetinkaya (2005). Case study of sympathetic interaction between transformers caused by inrush transients. In *International Conference on Power Systems Transients*, Number IPST05 – 125, Montreal.
- Shin, M., C. Park, e J. Kim (2003). Fuzzy logic-based relaying for large power transformer protection. *Power Delivery, IEEE Transactions on* 18(3), 718–724.
- Tripathy, M., R. Maheshwari, e H. Verma (2005). Advances in transformer protection: A review. *Electric Power Components and Systems* 33(11), 1203–1209.
- Walker, J. S. (1999). *A Primer on Wavelets and Their Scientific Applications*. Washington: Chapman & Hall (CRC).
- Wiszniewski, A. e B. Kasztenny (1995). A multi-criteria differential transformer relay based on fuzzylogic. *Power Delivery, IEEE Transactions on* 10(4), 1786–1792.
- Youssef, O. (2003). A wavelet-based technique for discrimination between faults and magnetizing inrush currents in transformers. *Power Delivery, IEEE Transactions on* 18(1), 170–176.

- Youssef, O. (2004). Applications of fuzzy-logic-wavelet-based techniques for transformers in-rush currents identification and power systems faults classification. *Power Systems Conference and Exposition, 2004. IEEE PES*, 553–559.
- Zadeh, L. (1965). Fuzzy sets [J]. *Information and Control* 8(3), 338–353.
- Zheng, G., X. Yan, H. Li, e D. Liu (2004). Classification of voltage sag based on wavelet transform and wavelet network. *Machine Learning and Cybernetics, 2004. Proceedings of 2004 International Conference on* 1.
- Zimmermann, H. (2001). *Fuzzy Set Theory—and Its Applications*. Kluwer Academic Publishers.