CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS – CEFET/MG
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO - DPPG
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA - PPGEL

NOVACK HENRIQUE GARCIA SILVA

AVALIAÇÃO DA PROTEÇÃO DIFERENCIAL DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA A PARTIR DA TRANSFORMADA WAVELET

Orientador: Rafael Silva Alípio
Coorientador: Eduardo Gonzaga da Silveira

Belo Horizonte
Dezembro de 2019

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS – CEFET/MG

DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO - DPPG

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA - PPGEL

NOVACK HENRIQUE GARCIA SILVA

AVALIAÇÃO DA PROTEÇÃO DIFERENCIAL DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA A PARTIR DA TRANSFORMADA WAVELET

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, em Associação Ampla entre o Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais e a universidade federal de São João Del Rei, como requisito parcial para o obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador(a): Rafael Silva Alípio

Coorientador: Eduardo Gonzaga da Silveira

Belo Horizonte

Dezembro de 2019

Silva, Novack Henrique Garcia
S586a Avaliação da proteção diferencial de transformadores de potência a partir da transformada wavelet. / Novack Henrique Garcia Silva. – – Belo Horizonte, 2019.
115f. : il.

Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica em associação ampla com a Universidade Federal de São João Del Rei, 2019.

Orientador: Prof. Dr. Rafael Silva Alípio
Coorientador: Prof. Dr. Eduardo Gonzaga da Silveira

Bibliografia

1.Sistemas Elétricos de Potência. 2.Transformadores Elétricos – Proteção. 3. Transformada Wavelet. I. Alípio, Rafael Silva. II. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. III. Título

CDD 621.317

Elaboração da ficha catalográfica pela Bibliotecária Elisângela Gonçalves Barbieri CRB-6: 2624 / CEFET-MG

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL REI
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Novack Henrique Garcia Silva

"Avaliação da Proteção Diferencial de Transformadores de Potência a Partir da Transformada Wavelet"

Dissertação nº 194 apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica – Associação Ampla entre a Universidade Federal de São João Del-Rei e o Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais em 28 de Fevereiro de 2019 como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, aprovada pela Banca Examinadora constituída pelos professores:

Prof. Dr. Rafael Silva Alípio (Orientador)
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Prof. Dr. Eduardo Gonzaga da Silveira (Coorientador)
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Profª. Drª. Ursula Do Carmo Resende
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Prof. Dr. Luís Henrique Lopes Lima
Universidade Federal de Juiz de Fora

Dedicatória

A Deus e à minha família, em especial para minha esposa Lívia Palhares pelo amor e carinho, para minha companheira de estudos Blue e aos meus avós, Otacílio e Dolorinda, por serem as pessoas mais maravilhosas nessa vida.

Agradecimentos

Primeiramente a Deus por me fortalecer todos os dias e sempre me guiar espiritualmente.

À minha esposa, Lívia Horta Palhares, que assumiu desde o princípio dessa dissertação o compromisso de fazer esse sonho acontecer e teve a paciência e carinho em me tranquilizar em momentos que eu acreditava não ser capaz de atingir os objetivos deste trabalho. Sem o apoio e a confiança que em mim ela depositou, esse trabalho não seria o mesmo.

Aos meus pais, Orlando Donizetti Silva e Elenice Garcia de Matos Silva, por serem os meus maiores exemplos de vida e por sempre confiarem em mim e a toda minha família por entender a importância deste trabalho.

À minha irmã, Daniela Cristine Garcia Silva, por ser a pessoa que sempre me tomou como referência e fez parte da construção dos valores pessoais e profissionais tão importantes para execução deste trabalho.

Aos meus sogros, Evandro e Vera Palhares, cujo amor fraternal por mim em muito me admira e por não hesitarem em ajudar para o sucesso deste trabalho.

Ao Centro Federal de Educação Tecnológica, mais uma vez, por todos os ensinamentos e por todas as experiências acadêmicas e profissionais proporcionadas.

Ao Professor do Departamento de Engenharia Elétrica do CEFET-MG, Dr. Eduardo Gonzaga, por todos os direcionamentos, motivação e compreensão na elaboração deste trabalho.

Aos amigos da Graduação e do Mestrado do CEFET-MG, em especial aos amigos do Mestres da Resenha, Daiane Rafael, Matheus Duarte, Audine Sena, Pedro Santos, Isabel Lima, Ramon Henriques, Deishi Santos e Rafael por me concederem o privilégio da amizade de vocês e por tornarem a vida acadêmica leve, prazerosa e marcada por boas resenhas.

À Houer Consultoria e meus colegas de trabalho, em especial ao Mateus Moreira e ao Gustavo Palhares, por sempre me incentivarem no meu crescimento profissional.

Ao governo brasileiro por acreditar nos frutos deste trabalho e seus desdobramentos.

“Um dia, quando olhares para trás, verás

que os dias mais belos foram aqueles em que lutaste”

Sigmund Freud

Resumo

Os transformadores de potência são equipamentos imprescindíveis ao suprimento de energia elétrica, cujo reparo ou substituição implica maior tempo de interrupção, custos diretos e indiretos. O alto custo deste equipamento, aliado à sua importância para o sistema elétrico, requer uma atenção especial quanto à sua operação, proteção e manutenção. É essencial que as concessionárias de energia elétrica invistam em sistemas de proteção que garantam ao sistema elétrico segurança, confiabilidade e maior qualidade de serviço. A principal metodologia adotada para proteção dos transformadores de potência corresponde à proteção diferencial, utilizando tradicionalmente a estimação de fasores de frequência fundamental, por meio dos quais se calculam as correntes de operação e restrição. A partir de um plano operacional, com regiões de atuação e bloqueio, tem-se a atuação ou não do relé. Para discriminar faltas e condições de energização, normalmente utiliza-se a análise harmônica pela transformada de Fourier. Apesar da grande aplicabilidade da proteção diferencial utilizando a ferramenta proposta por Fourier, o relé diferencial pode ser sensibilizado por eventos transitórios em que não se deseja que a proteção isole o sistema. A principal limitação do método de Fourier consiste no fato de não apresentar a capacidade de analisar as correntes diferenciais de operação e restrição em tempo-frequência. O presente trabalho, portanto, propõe a utilização da transformada *wavelet* cuja característica principal consiste em analisar sinais tanto no domínio do tempo como no domínio da frequência. A metodologia para aprimorar o desempenho da proteção diferencial em transformadores de potência corresponde em decompor o sinal de análise em coeficientes de aproximação e de detalhe a partir da técnica de análise de multi-resolução (AMR) da transformada *wavelet* e, por meio da variação de energia espectral dos coeficientes, propor uma lógica operacional para discriminar faltas internas de outros eventos. A eficácia do algoritmo é atestada a partir da submissão do algoritmo a um conjunto de simulações obtidas de sistema elétrico modelado no software ATPDraw com elementos suficientes para reproduzir os efeitos dos transitórios eletromagnéticos no transformador de potência.

Palavras-chave: Transformador de Potência. Proteção Diferencial. Transformada Wavelet. Análise Multi-resolução.

Abstract

Power transformers are essential equipment for the supply of electrical energy, whose repair or replacement implies longer interruption time, direct and indirect costs. The high cost of this equipment and its importance for the electrical system requires special attention to its operation, protection and maintenance. It is essential that electric power companies invest in protection systems that guarantee safety, reliability and higher quality of service to the electrical system. The main methodology adopted for the protection of power transformers corresponds to the differential protection, using traditionally the estimation of fundamental frequency phasors to calculate the operating and restriction currents. From an operational plan, the operation of the relay is mapped in regions of actuation and blocking (normal operation). In order to discriminate faults and energization conditions, the harmonic analysis by the Fourier transform is normally used. Despite the great applicability of the differential protection using the tool proposed by Fourier, the differential relay can be sensitized by transient events in which the protection is not desired to isolate the system. The main limitation of the Fourier method consists in the inability to analyze the differential currents of operation and restriction in time-frequency. The present work, therefore, proposes the use of the wavelet transform whose main characteristic is to analyze signals in both the time domain and the frequency domain. From the multi-resolution analysis technique (MRA) of the wavelet transform, the analysis signal is decomposed into approximation and detail coefficients and, through the spectral energy variation of the coefficients, an operational logic is proposed to discriminate faults other events. The efficiency of the algorithm is attested from the submission of the algorithm to a set of simulations obtained from the electrical system modeled in the ATPDraw software with enough elements to reproduce the effects of the electromagnetic transients in the power transformer.

Keywords: Power Transformer. Differential Protection. Wavelet transform. Multi-resolution analysis.

Lista de Figuras

Figura 2.1 - Esquema da proteção diferencial percentual aplicado em um transformador monofásico [4]).....24
Figura 2.2 - Característica de atuação da proteção diferencial percentual (adaptado de [9])....26
Figura 2.3 - Produção de corrente de *inrush* em um transformador (Retirado de [14])....29
Figura 2.4 – Curva de Histerese *B x H* (adaptado de [25])....30
Figura 2.5 - Corrente de magnetização e fluxo magnético (Retirado de [26]) 31
Figura 2.6 - Correntes de magnetização durante a energização de um transformador de potência 34
Figura 2.7 - Energização solidária (adaptado de [32]) 38
Figura 2.8 - Caso de falta interna sem a saturação do TC (retirado de [35])....40
Figura 2.9 - Caso de falta interna com saturação de TC (retirado de [35]) 41
Figura 3.1 – Janelas de processamento de sinais no plano tempo x frequência da TFJ e da TW (Retirado de [9]) 48
Figura 3.2 – Formas de ondas de *wavelets* mãe....51
Figura 3.3 - Função de escala e *wavelet* mãe da Daubechies 6 53
Figura 3.4 – Decomposição por AMR de sinal *s* a partir da TW (Retirado de [34])....54
Figura 4.1 – Símbolos dos modelos aplicados para simulação do gerador do SEP....58
Figura 4.2 – Disposições geométricas dos condutores nas torres de transmissão (Adaptado de [64]) 60
Figura 4.3 – Símbolo do modelo LCC (*Line Cable Constants*) do *software* ATP 61
Figura 4.4 – Janela de parametrização do modelo JMARTI 61
Figura 4.5 – Janela de parametrização dos dados geométricos da linha de transmissão modelado a partir de JMARTI.....61
Figura 4.6 - Curva característica do TC (Adaptado de [67]) 63
Figura 4.7 – Janelas de parametrização do TC no enrolamento primário do TDP a partir do transformador saturável (Atributos)....64
Figura 4.8 - Janelas de parametrização do TC no enrolamento primário do TDP a partir do transformador saturável (característica da curva de saturação)....64
Figura 4.9 - Janelas de parametrização do TC no enrolamento secundário do TDP a partir do transformador saturável (Atributos)....65
Figura 4.10 - Janelas de parametrização do TC no enrolamento secundário do TDP a partir do transformador saturável (característica da curva de saturação)....65
Figura 4.11 – Simbologia do transformador saturável 65
Figura 4.12 Representação do circuito estrela de transformadores de N- enrolamentos (Retirado de [71]) 68
Figura 4.13 - Símbolo do modelo BCTRAN no *software* ATP....71
Figura 4.14 – Entrada de parâmetros obtidos a partir do ensaio de curto-circuito para o transformador trifásico.71
Figura 4.15 - Entrada de parâmetros obtidos a partir do ensaio a vazio para o transformador trifásico 72
Figura 4.16 – Janela de parametrização da rede de distribuição entre TDP e centro de carga....73
Figura 4.17 - Símbolo da carga elétrica modelada do SEP no ATP 74
Figura 4.18 – Parametrização da carga elétrica projetada no ATP 74

Figura 4.19 - Sistema elétrico modelado no *software* ATP 75
Figura 4.20 – Corrente diferencial durante a energização do TDP a vazio 78
Figura 4.21 - Harmônicos da corrente diferencial durante a energização do TDP a vazio 79
Figura 4.22 - Falta Bifásica AB aplicada no ponto B do sistema elétrico modelado 80
Figura 4.23 - Falta Bifásica Terra aplicada no ponto A do sistema elétrico modelado 81
Figura 4.24 - Corrente diferencial após saturação de TC provocada por uma falta externa 82
Figura 4.25 - Sobre-excitação do TDP modelado 83
Figura 4.26 - Harmônicos característicos do evento de sobre-excitação do TDP modelado 83
Figura 5.1 - Fluxograma geral da metodologia de proteção proposta 86
Figura 5.2 - Banco de filtros multi-estágio para AMR (adaptado de [3]) 89
Figura 5.3 - Gráfico de operação do relé diferencial convencional para caso de energização a vazio do TDP com ângulo de chaveamento de 10º 93
Figura 5.4 - Gráfico *bias* do relé diferencial convencional para caso de energização a vazio do TDP com ângulo de chaveamento de 10º 94
Figura 5.5 - Coeficientes de detalhe de D1 a D5 para um caso de energização de TDP 95
Figura 5.6 - Energias espectrais E1 a E5 para o caso de energização de TDP 96
Figura 5.7 - Energias espectrais E1 e E2 para o caso de energização do TDP 96
Figura 5.8 - Gráfico *bias* do fenômeno de saturação de TC 97
Figura 5.9 - Energias espectrais de D1 a D5 para o caso de saturação de TC 98
Figura 5.10 - Energia espectral do detalhe D1 para um caso de sobre-excticação 99
Figura 5.11 - Energias espectrais E1 a E5 para um caso de sobre-excitação 100
Figura 5.12 - Gráfico de operação do relé diferencial para um caso de falta interna ABT 101
Figura 5.13 - Gráfico *Bias* do relé diferencial convencional para um caso de falta interna ABT 101
Figura 5.14 – Coeficientes *wavelet* de detalhe para um caso de falta interna bifásica terra (ABT) 102
Figura 5.15 - Energias espectrais dos coeficientes *wavelet* de detalhe para um caso de falta interna bifásica terra (ABT) 103
Figura 5.16 - Gráfico *bias* para um caso de falta externa 104

Lista de Tabelas

Tabela 1.1 - Estatística de falha para alguns equipamentos do sistema (Retirado de [1]) 15
Tabela 2.1 Concentração de harmônicas da corrente de magnetização proporcional a componente fundamental (Retirado de [23]).....34
Tabela 4.1 – Parâmetros do Gerador 58
Tabela 4.2 – Valores dos parâmetros geométricos da torre de transmissão 60
Tabela 4.3 – Parâmetros aplicados nos TCs 63
Tabela 4.4 – Guia de modelagem para transformador de potência por faixa de frequência (Retirado de [68]).....66
Tabela 4.5 - Eventos transitórios em SEP e suas frequências associadas (Retirado de [69]).....67
Tabela 4.6 - Parâmetros do transformador trifásico determinados a partir do ensaio de curto-circuito (Retirado de [75]) 70
Tabela 4.7 – Parâmetros do transformador trifásico determinados a partir do ensaio a vazio (Retirado de [75]) .71
Tabela 4.8 – Parâmetros da linha de transmissão entre TDP e centro de carga.....73
Tabela 4.9 Dados de carga ligadas ao fim da linha de transmissão 73
Tabela 4.10 - Casos simulados a partir do SEP modelado no *software* ATP 77
Tabela 5.1 – Lógica operacional para classificação dos distúrbios.....92
Tabela 5.2 – Resultados do algoritmo proposto a partir da TWD 105

Lista de Abreviações

AMR - Análise Multi-Resolução

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

ANSI - *American National Standards Institute*

ATP - *Alternative Transients Program*

DC - *Direct Current* (corrente contínua)

LCC - *Line Cable Constants*

LD - Linha de Distribuição

LT - Linha de Transmissão

ONS - Operador Nacional do Sistema

RNA - Redes Neurais Artificiais

SEP - Sistema Elétrico de Potência

SIN - Sistema Interligado Nacional

SVM - *Support Vector Machine*

TC - Transformador de Corrente

TDP - Transformador de Potência

TF - Transformada de Fourier

TFD - Transformada de Fourier Discreta

TFJ - Transformada de Fourier Janelada

TW - Transformada *Wavelet*

TWC - Transformada *Wavelet* Contínua

TWD - Transformada *Wavelet* Discreta

TWDR - Transformada *Wavelet* Discreta Redundante

Lista de Símbolos

B - densidade de fluxo magnético

H - fluxo magnético

θ - ângulo de chaveamento da tensão senoidal aplicada

$\emptyset$ - valor instantâneo do fluxo magnético

i_{1s} - sinal de corrente elétrica do enrolamento primário do TDP obtido pelo secundário do TC

i_{2s} - sinal de corrente elétrica do enrolamento secundário do TDP obtido pelo secundário do TC

K - fator de regulação do sistema de proteção difernecial

I_D - corrente diferencial do sistema de proteção diferencial

I_{RT} - corrente de restrição do sistema de proteção diferencial

ω - frequência em rad/s

f - frequência em Hz

ψ - *wavelets*

Sumário

Capítulo 1 - Introdução 15
1.1. Relevância do tema e contextualização 15
1.2. Objetivo 18
1.3. Organização do texto 18
Capítulo 2 - Proteção Diferencial em Transformadores de Potência 20
2.1. Proteção de transformadores 20
2.2. Proteção diferencial 22
2.3. Funcionamento da proteção diferencial em transformadores de potência 23
2.4. Causas do surgimento de correntes diferenciais indesejadas 27
2.5. Considerações finais 41
Capítulo 3 - Transformada *Wavelet* 43
3.1. Introdução 43
3.2. Revisão bibliográfica 44
3.3. Desafio da proteção de diferencial em transformadores de potência 46
3.4. Transformada Wavelet 47
3.5. Análise Multi-Resolução (AMR) 52
3.6. Cálculo da energia dos coeficientes *wavelet* para discriminação de dos eventos a partir da TW 54
3.7. Considerações finais 55
Capítulo 4 - Modelagem do Sistema Elétrico de Potência 56
4.1. Revisão bibliográfica 56
4.2. Componentes do sistema elétrico de potência 57
4.3. Sistema elétrico de potência modelado 74
4.4. Simulações realizadas 76
4.5. Considerações finais 83
Capítulo 5 - Metodologia de Proteção Diferencial e Resultados Obtidos 85
5.1. Introdução 85
5.2. Algoritmo de proteção diferencial 85
5.3. Análise dos resultados 92
5.4. Considerações finais 105

Capítulo 6 - Conclusão 106
6.1. Sugestões para trabalhos futuros..... 107
Referências Bibliográficas 108

Capítulo 1- Introdução

Este capítulo apresenta a relevância e contextualização do tema, objetivos e organização da dissertação.

1.1. Relevância do tema e contextualização

Os transformadores de potência são equipamentos imprescindíveis ao suprimento de energia elétrica, cujo reparo ou substituição implica em maior tempo de interrupção, custos diretos e indiretos. São equipamentos fundamentais por serem responsáveis pela transferência de energia de um subsistema a outro em diferentes níveis de tensão, permitindo uma redução de perdas elétricas por meio da diminuição dos valores de corrente na transmissão de energia e mantendo a frequência de operação do sistema elétrico.

A Tabela 1.1 mostra as taxas de falha registradas em diversos elementos de um dado sistema elétrico [1]. Destaca-se que 10% das falhas registradas ocorrem em transformadores de potência. Dessa forma, somada a relevância do equipamento, é essencial que concessionárias de energia elétrica invistam em sistemas de proteção de transformadores, a fim de garantir segurança, confiabilidade e maior qualidade de serviço.

Tabela 1.1 - Estatística de falha para alguns equipamentos do sistema (Retirado de [1])

Equipamento	Taxa Falha [%]
Linhas de Transmissão	50,0
Disjuntores	12,0
Transformadores de Corrente, equipamentos de controle, etc.	12,0
Transformadores	10,0
Cabos Subterrâneos	9,0
Geradores	7,0
Total	100,0

O alto custo desse equipamento, aliado à sua importância para o sistema elétrico, requer uma atenção especial quanto à sua operação, proteção e manutenção. Na ocorrência de alguma falha interna no transformador de potência (TDP), a concessionária de energia elétrica deve estar dotada de um sistema de proteção que o isole, para que seja feita a manutenção corretiva

do equipamento. Esse procedimento de atuação frente a falhas internas impede a perda total e, por consequência, a troca de um componente de elevado custo. Nesse sentido, aplicam-se relés de proteção em equipamentos de um sistema elétrico de potência (SEP) com o objetivo de isolá-los do resto do sistema, minimizar os danos aos equipamentos faltosos e os riscos para as pessoas, além de evitar falhas em equipamentos adjacentes ao local da falta [2].

A principal metodologia aplicada à proteção dos transformadores de potência corresponde à proteção diferencial percentual que por meio do relé diferencial, compara as correntes de entrada e saída do equipamento protegido de modo a detectar falhas internas e isolar o transformador do sistema elétrico. Mesmo considerando a aplicação em larga escala para proteção em transformadores de potência, a filosofia de proteção diferencial percentual pode apresentar erros na identificação e discriminação de determinados eventos, como por exemplo as correntes de energização, ou correntes de *inrush* [3]. Isto também pode ser observado em eventos associados à saturação de transformadores de corrente (TCs), faltas externas próximas ao transformador, sobre-excitação e energização de TDP conectados em paralelo (energização solidária) [4]. Todos esses eventos promovem o surgimento de correntes diferenciais no relé diferencial que podem levá-lo à operação indevida. Dessa forma, a correta e rápida discriminação entre os eventos supracitados e as faltas internas no transformador representa uma das principais dificuldades da tradicional metodologia de proteção.

A fim de mitigar os erros associados à operação indevida da proteção diferencial percentual em transformadores de potências, são utilizadas técnicas digitais como blocos operacionais. O princípio de funcionamento corresponde ao bloqueio ou restrição das componentes de segunda, quarta ou quinta harmônicas predominantes em eventos com transitórios eletromagnéticos como energização do TDP, sobre-excitação, saturação e os demais eventos já mencionados [5]. Ressalta-se que embora as técnicas de restrição e bloqueio de harmônicos apresentem certa confiabilidade na operação dos relés diferenciais, o processo de filtragem das componentes é lento e pode eventualmente ignorar faltas internas com componentes de segunda harmônica, condição particular na ocorrência de saturação dos TCs decorrente de falta interna severa e/ou pela presença de capacitância *shunt* para ajuste de fator de potência em linhas de transmissão [6]. Essa possibilidade é especialmente preocupante em um cenário em que faltas dessa natureza possuem potencial de provocar perdas irreparáveis ao transformador no caso de não atuação da proteção.

Além dos fatores expostos relativos à importância do TDP para sistemas de transmissão e dos desafios inerentes à rápida e adequada definição de seu sistema de proteção, outros fatores

contribuem para promoção e esforço em desenvolver novas técnicas de proteção que garantam confiabilidade, celeridade e assertividade em sua operação. Destacam-se entre estes fatores [7]:

- Elevado custo de investimento: os transformadores de potência são equipamentos de elevado valor de aquisição e restauração;
- Prazo de aquisição não-imediato: tendo em vista as características especiais de cada sistema e os processos de fabricação envolvidos, os transformadores de potência não são equipamentos de pronta entrega, demandando alguns meses para serem projetados e fabricados;
- Impossibilidade de transportar o transformador de potência montado: devido ao peso e às dimensões, bem como à fragilidade de alguns componentes, os transformadores de alta e extra-alta tensão não podem ser transportados montados, ou seja, em condições prontas para operar;
- Elevado tempo de montagem: considerando as dificuldades técnicas e a necessidade de recursos logísticos de grande porte envolvidos na montagem em campo, além dos imprescindíveis trabalhos de tratamento do óleo isolante, transformadores demandam mais tempo que os demais para terem sua montagem finalizada;

- Multas aplicadas pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica): A ANEEL segundo seu ofício supervisiona e controla o serviço e qualidade prestado pelas companhias de energias elétricas responsáveis pela distribuição de energia elétrica a partir dos indicadores DEC (Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora), FEC (Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidor), DIC (Duração de Interrupções por Unidade Consumidora ou ponto de conexão considerado), FIC (Frequência de Interrupções por Unidade Consumidora ou ponto de conexão considerado), DMIC (Duração Máxima das Interrupções por Unidade Consumidora ou ponto de conexão considerado). Os indicadores estão relacionados diretamente a continuidade do fornecimento de energia elétrica e na agilidade em atender ao desligamento do sistema. A ANEEL estabelece metas de desempenho às empresas distribuidoras para cada um dos indicadores supracitados, sendo essas não atendidas acarretam penalidades e multas financeiras. Nesse sentido, é importante que o sistema de proteção do transformador de potência opere adequadamente prevenindo situações que necessitem de longo período de

desligamento do sistema para manutenção e aquelas associadas as erros de operação do sistema de proteção.

1.2. Objetivo

O objetivo principal deste trabalho consiste em avaliar o desempenho da proteção diferencial de transformadores na discriminação e classificação de distúrbios, por meio da análise multi-resolução (AMR) da Transformada *Wavelet* (TW*).* Um conjunto de simulações de um sistema elétrico de potência, modelado no *software* ATP, por meio da interface gráfica ATPDraw[1] são utilizadas para testes e obtenção dos resultados.

Levando-se em consideração o contexto e o objetivo principal deste trabalho, as seguintes atividades podem ser definidas como norteadoras:

- Estabelecimento de um modelo de sistema elétrico de potência e especialmente do transformador, permitindo simular condições normais e especiais de funcionamento tais como energização de TDP, energização solidária, sobre-excitação, saturação de transformadores de corrente, rejeição de carga, falta interna, falta externa e operação normal de carga;
- Desenvolvimento de algoritmo no MATLAB com capacidade de discriminar e classificar os distúrbios, que o transformador de potência é submetido, a partir da análise de sinais aplicando a TW;
- Avaliação da confiabilidade do algoritmo proposto a partir do conjunto de simulações do SEP modelado no *software* ATP.

1.3. Organização do texto

Este trabalho está estruturado em seis capítulos, incluindo este introdutório.

O Capítulo 2 apresenta a visão geral do esquema de proteção diferencial de transformadores de potência, focando na descrição das características de funcionamento do relé diferencial percentual. Adicionalmente ao princípio da proteção diferencial percentual, são

[1] O ATPDraw é um pré-processador gráfico para a versão ATP do Programa de Transientes Eletromagnéticos (EMTP) desenvolvido por H. K. Høidalen para simulações de fenômenos eletromagnéticos no SEP.

descritas limitações e as principais situações que levam o relé de proteção à operação inadequada.

O Capítulo 3 apresenta o estudo do estado da arte sobre o princípio de funcionamento da transformada *wavelet* aplicada em sistemas de proteção, bem como a descrição breve da filosofia de proteção a partir da transformada de Fourier para levantamento dos desafios que relacionam a essa filosofia.

O Capítulo 4 descreve os critérios para determinação dos parâmetros de cada componente elétrico do SEP modelado no *software* ATP, considerando as situações e eventos a partir dos quais a metodologia proposta de proteção proposta será submetida.

O Capítulo 5 apresenta os resultados e análises das simulações a partir da metodologia proposta, avaliando o desempenho da técnica proposta e sua celeridade na tomada de decisão.

O Capítulo 6 apresenta as conclusões e sugestões de trabalhos futuros.

Capítulo 2 - Proteção Diferencial em Transformadores de Potência

Este capítulo apresenta as características de operação da proteção diferencial em transformadores de potência, destacando a técnica de proteção diferencial percentual.

2.1. Proteção de transformadores

Os transformadores de potência, como já preconizado, são equipamentos imprescindíveis ao SEP e segundo seu ofício, carecem de atenção especial no desenvolvimento de sistemas de proteção. Nesse sentido, a proteção do TDP deve ser projetada visando garantir confiabilidade[2], seletividade[3], rapidez[4] e sensibilidade[5], de tal forma que contribua para o atendimento dos critérios de continuidade, de qualidade e entre outros impostos às concessionárias de energia pelo Operador Nacional do Sistema (ONS) e a Agência de Energia Elétrica (ANEEL). O objetivo desses critérios é evitar danos severos a esses equipamentos, os quais possuem alto custo de aquisição e elevado prazo de fornecimento.

A filosofia de proteção aplicada comumente em TDP corresponde à proteção unitária ou restrita em razão de apresentar atuação relativamente rápida e confiável quando comparada a outras proteções [8]. A proteção unitária estabelece a zona de proteção nos limites físicos onde se estabelecem os TCs. Nesse sentido, observam-se na proteção do TDP, distúrbios elétricos de origem interna e externa. Os distúrbios de origem externa são aqueles que acontecem fora da zona de proteção, e podem ser caracterizados por sobrecargas, sobretensões, sub-frequências e curtos-circuitos externos. Os distúrbios de origem interna são aqueles que ocorrem dentro da zona de proteção, normalmente provocados por: curtos-circuitos internos entre fases, curtos-circuitos entre espiras do transformador de potência, curtos-circuitos entre os enrolamentos de alta tensão e os de baixa tensão, curto-circuito entre o enrolamento e o tanque do transformador, faltas no núcleo magnético, faltas no tanque de expansão, entre outras

[2] A habilidade do sistema atuar corretamente quando necessário e para evitar atuações incorretas ou indevidas
[3] Capacidade de isolar a menor área do SEP com indicativo de distúrbio elétrico.
[4] Capacidade da proteção atuar no menor tempo possível de forma a proteger o equipamento
[5] Capacidade do sistema de proteção em responder às anomalias nas condições de operação

[9, 10]. Em função de sua importância para o SEP, os transformadores de potência apresentam mecanismos de proteção contra distúrbios, sejam eles internos ou externos, com princípios de funcionamento distintos entre si e de atuação, entre as quais citam-se [11]:

- **Fusíveis**: Proteção estabelecida comumente em transformadores de potência com nível de potência inferior a 10 MVA [5]. Promovem a proteção com baixo custo de manutenção e de aquisição em virtude de não exigirem dispositivos de controle, disjuntores e baterias. Apresentam limitação para alguns tipos de distúrbios internos ao transformador de potência por estabelecerem proteção monofásica não integrada entre as fases. Assim não isolam por completo o transformador de potência quando observados distúrbios com apenas uma ou duas fases envolvidas.
- **Proteção diferencial**: A proteção diferencial corresponde ao número 87 da tabela ANSI [12] das funções de proteção. Protege o transformador de potência frente a distúrbios internos e opera a partir do princípio básico da Lei de Kirchhoff da correntes, em que as correntes que entram no transformador devem ser iguais às correntes que saem deste. Caso não o sejam, tem-se necessariamente a circulação indevida de corrente em algum ponto interno ao equipamento, constatando falta interna.
- **Proteção de gás**: Estabelecida a partir do relé de Buchholz, função número 63, detecta a formação de bolhas de gás dentro do óleo mineral isolante. Sabe-se que essas bolhas são oriundas de falhas de isolamento no interior do equipamento, provocando indesejável circulação de correntes de fuga, elevando pontualmente a temperatura do óleo isolante. Nesse sentido, a proteção 63 permite detecção do estado de isolamento do equipamento; [13].
- **Válvula de alívio de pressão**: Proteção estabelecida mecanicamente por válvula de alívio de pressão, função número 20. A proteção visa proteger de sobrepressões decorrentes de distúrbios internos em transformadores que podem danificar, estufar ou até explodir o tanque de óleo do transformador, causando sérios riscos aos equipamentos da subestação, à estação transformadora e especialmente ao ser humano [11].
- **Proteção térmica**: É a temperatura do óleo, função número 26 ou por relé de imagem térmica, função número 49. Tem por objetivo supervisionar a

temperatura interna do transformador de potência garantindo a manutenção adequada de sua isolação e evitando o envelhecimento prematuro.

- **Proteção de baixo nível de óleo**: Dispositivo de nível de óleo, número 71, que sinaliza necessidade de manutenção quando o nível de óleo do transformador está baixo.
- **Proteção de sobrecorrente**: Relé de proteção com atuação instantânea e temporizada, correspondentes respectivamente aos números 50 e 51. Protegem o transformador de faltas externas;
- **Proteção de sobre-excitação**: Verificação da ocorrência de sobre-excitação, número 24, que mensura a relação V/Hz. Visa proteger o núcleo do transformador de potência e evitar o sobreaquecimento dos componentes de isolação.

A presença de todos os mecanismos de proteção no construtivo dos transformadores de potência está relacionada com seu custo de aquisição e sua importância para o SEP, de tal forma que, transformadores de pequena e média potência podem apresentar um menor número de funcionalidades de proteção na comparação com transformadores de alta potência.

O presente trabalho apresenta como foco de estudo a proteção diferencial. Apresenta-se a seguir seu princípio de funcionamento e os fenômenos elétricos que podem acarretar atuações indevidas, trazendo complexidade na operação da proteção diferencial, indicando a necessidade de desenvolvimento tecnológico para mitigar erros.

2.2. Proteção diferencial

A proteção diferencial corresponde à principal técnica aplicada em transformadores de potência, na qual o dispositivo compara as correntes de entrada e de saída do elemento ou sistema protegido. A técnica de proteção monitora, portanto, constantemente as formas de onda de corrente nos enrolamentos primário e secundário do TDP por meio da aquisição de dados dos TCs [4].

A comparação das ondas de corrente passa preliminarmente pela correção das correntes por meio de técnica digital ou por esquema de conexão oposta entre os TCs ao esquema de conexão no primário e secundário do TDP. Após serem corrigidos, os sinais são transferidos para o relé, dispositivo de proteção cuja função é analisar os sinais, e na existência de falta, ou seja, quando a diferença entre os valores de corrente do primário e secundário ultrapassar um

limiar estipulado, enviar um sinal de *trip*[6] para o disjuntor, desconectando o transformador da rede.

Em condições normais de funcionamento do transformador, as correntes obtidas nos lados primário e secundário pelos TCs são praticamente iguais, salve apenas diferença provisionada [4]. Enquanto nas situações de falta interna no transformador de potência, isto é, dentro da região protegida pelo relé da proteção diferencial, será detectado pela análise dos sinais obtidos pelos TCs uma diferença significativa entre as correntes que entram e que saem do sistema protegido. Nessa ocasião, o relé será sensibilizado e executará o procedimento de isolação do transformador por meio de comando de operação de abertura do disjuntor associado ao transformador.

O relé diferencial deve permanecer em bloqueio em situações particulares de funcionamento dos SEPs, tais como falta externa, sobre-excitações (tensão observada a níveis superiores a nominal), energização de transformadores de potência, manobra que provoca o surgimento de correntes de magnetização ou também denominadas de *inrush*, que são transitórias, mas com amplitude entre 6 e 20 vezes maior que a corrente nominal [10, 14, 3], saturação do núcleo de magnetização dos TCs e em situações de rejeição de carga. Não obstante, as situações supracitadas podem provocar correntes diferenciais com potencial de resultar na sensibilização inadequada do relé de proteção diferencial.

2.3. Funcionamento da proteção diferencial em transformadores de potência

A proteção diferencial se estabelece como uma técnica de proteção que embora apresente historicamente avanços tecnológicos com a utilização de blocos de processamento de sinais, conferindo maior confiabilidade e segurança ao SEPs, preserva os princípios básicos da filosofia da proteção diferencial percentual. Essa filosofia introduziu o conceito da bobina de retenção, ou também denominada bobina de restrição, para sistemas cujo elemento a ser protegido correspondesse à transformadores de potência com capacidade superior a 2,5 MVA [4].

O esquema de proteção diferencial percentual difundido na literatura é ilustrado na Figura 2.1.

[6] Corresponde ao sinal que é enviado ao disjuntor associado para isolação do equipamento protegido quando o sistema de proteção detecta um distúrbio elétrico.

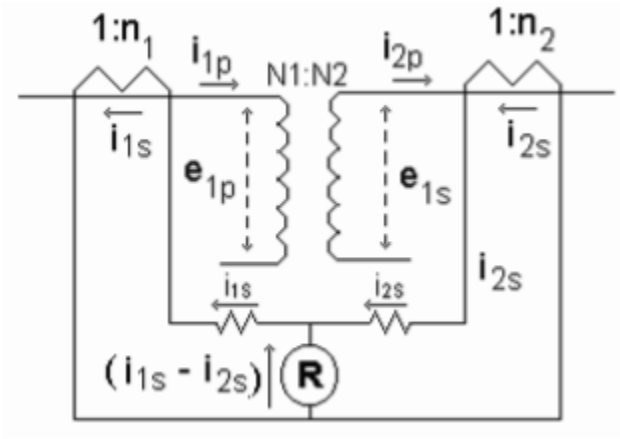


Figura 2.1 - Esquema da proteção diferencial percentual aplicado em um transformador monofásico [4]).

O esquema apresenta os TCs acoplados aos ramos primário e secundário do transformador de potência monofásico com relação de transformação *N1:N2*. Os TCs, por sua vez, apresentam relações de transformação $1:n_1$ e $1:n_2$ respectivamente para os ramos primário e secundário. As relações de transformação dos TCs devem necessariamente estar relacionadas à relação do transformador de potência, a fim de que as correntes no primário e no secundário, em condições normais de operação e em faltas externas, sejam iguais. Para isto, torna-se necessário assumir a seguinte razão entre as relações de transformação dos TCs e do transformador de potência: $N_1/N_2 = n_2/n_1$. Quando não respeitada a correspondência das relações de transformação entre o transformador de potência e os transformadores de corrente associados, o ajuste da relação pode ser realizado digitalmente durante o processamento de sinais.

Com a obtenção dos sinais oriundos dos TCs acoplados aos ramos primário e secundário devidamente adequados à relação de transformação do transformador de potência, em condições normais de operação as correntes i_{1S} e i_{2S} serão iguais, desconsiderando os erros de fase e amplitude. Nesse sentido, a corrente diferencial ou também denominada corrente de operação, que consiste na diferença entre a corrente do primário e secundário, conforme equação (2.1) será nula.

$$I_D = i_{1s} - i_{2s} \tag{2.1}$$

Em casos de faltas internas na região protegida pelo relé diferencial, os sinais oriundos dos TCs acoplados aos enrolamentos primário e secundário do transformador de potência

apresentarão corrente diferencial significativa, por consequência, esta sensibilizará o relé enviando a condição de *trip* ao disjuntor associado que isolará o transformador do SEP.

A sensibilização do relé diferencial na filosofia de proteção diferencial percentual decorre da situação em que a corrente diferencial calculada, conforme equação (2.1), sobrepõe determinado valor referência da bobina de restrição R do sistema. Esse valor de referência (I_{RT}) é dado pela média das correntes passantes nos enrolamentos primário e secundário, conforme se apresenta na equação (2.2).

$$I_{RT} = \frac{i_{1s} + i_{2s}}{2} \tag{2.2}$$

A proteção diferencial percentual apresenta ainda a capacidade de evitar falha operacional na decorrência de eventuais erros proporcionados pelas relações de TCs e das características construtivas do transformador de potência, bem como em outros equipamentos do SEP. Nesse sentido, adota-se um valor limiar ou valor de *pick-up*[7] para operação do relé e fator de regulação "*K*" que indicará a declividade ou inclinação (*bias*[8]*)* da curva de operação do relé, a qual retrata a relação entre a corrente diferencial (I_D) e a corrente que circula na bobina de restrição (I_{RT}). Dessa forma, apresentam-se dois ajustes conforme proposto anteriormente:

- Valor de corrente inicial mínima (corrente *pick-up*), minimizando eventuais erros provocados por imprecisões nos TCs e estabelecendo região de tolerância para eventos que podem saturar o TC, tais como sobre-excitação e faltas externas [4];
- Fator de regulação *K* que estabelece a correlação entre corrente diferencial e corrente de restrição. Esse fator minimiza eventuais erros provocados nas relações de transformação, mudança de tapes e erros de TCs [4] e bloqueia o envio da condição de *trip* para correntes diferenciais de baixa magnitude.

[7] Corresponde ao valor de corrente mínimo que estabelece região de tolerância em decorrência de imprecisões nos TCs ou de situações tais quais sobre-excitação e faltas externas que podem provocar saturação dos TCs.
[8] Corresponde à inclinação do gráfico de operação do relé diferencial que relaciona a corrente de operação ou corrente diferencial com a corrente de restrição.

O funcionamento do relé diferencial baseia-se na relação entre corrente diferencial, I_D, e a corrente de restrição ajustada, I_{RT}, e conforme fator de regulação K. A partir dos valores calculados para I_D e I_{RT} pelas equações (2.1) e (2.2), a proteção diferencial estabelece duas regiões operacionais: região de operação e de bloqueio. Na região de operação, as correntes diferenciais de cada fase são superiores às correntes de restrição considerando fator de regulação K. O relé diferencial opera enviando a condição de *TRIP* ao disjuntor associado isolando instantaneamente o TDP do SEP. Na região de bloqueio, as correntes diferenciais apresentam valores inferiores à corrente de restrição com fator de regulação K associado e o relé permanecerá em bloqueio operacional. A definição da região, conforme princípio de funcionamento, respeita as relações expressas em (2.3) e (2.4).

$$I_D \geq K \cdot I_{RT} \rightarrow Região\ de\ Operação \tag{2.3}$$

$$I_D < K \cdot I_{RT} \rightarrow Região\ de\ Bloqueio \tag{2.4}$$

A Figura 2.2 mostra a característica do relé diferencial percentual, destacando sua região de operação e de bloqueio.

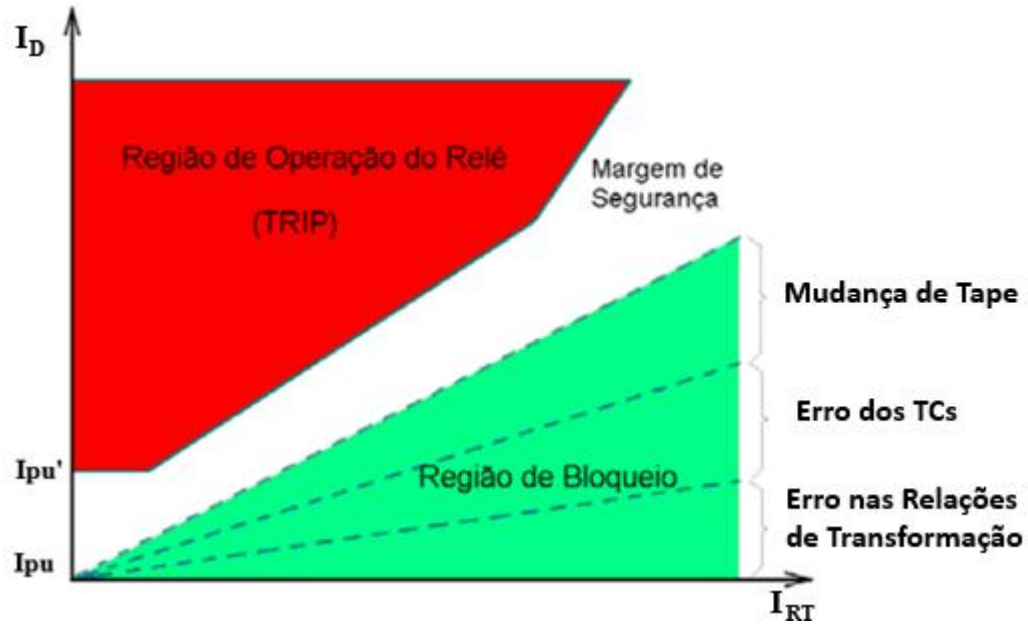


Figura 2.2 - Característica de atuação da proteção diferencial percentual (adaptado de [9])

A Figura 2.2 apresenta diferentes inclinações de curva que dependem da parametrização do valor *K* para definição da corrente de restrição. Os valores de *K* são geralmente expressos em percentagens, com valores típicos de 10, 20 e 40% [4]. A definição de tais percentagens

impacta diretamente na sensibilidade do relé diferencial, de tal forma que *K* parametrizado em 10% será mais sensível do que um relé parametrizado com *K* em 40%, sendo que nesse caso considera-se abrangência maior para os erros de medição, mudança de *tape,* erro de TC e de relações de transformação.

Conforme pode ser visualizado pela Figura 2.2, apresentam-se duas diferentes inclinações para determinação da atuação do relé diferencial. A aplicação das duas inclinações é comumente utilizada na prática em razão de que para baixas correntes de carregamento, o erro introduzido pelos TCs é menor, aplicando, assim, fator de regulação *K* mais sensível para baixas correntes e menos sensível para altas correntes [4]. Em [15] destaca-se a importância da implementação da segunda inclinação com fator de regulação mais sensível, a fim de acomodar os maiores erros introduzidos pelos TCs devido às altas correntes de carga e possíveis saturações em condições de faltas externas.

Como já descrito, a corrente inicial mínima, corrente de *pick-up* (*Ipu*), assume valor de tolerância quando identificado pelo relé diferencial em situações que podem levar a saturação do TC, como uma sobre-excitação ou uma falta externa, deslocando o valor de *Ipu* para acima do valor estipulado (*Ipu')* e a curva do relé é então alterada para que se evite a operação desnecessária do relé [16].

Apesar da eficácia da filosofia de proteção diferencial percentual, existem situações nas quais o relé diferencial pode enviar a condição de *trip* erroneamente por evidenciar as correntes diferenciais indesejadas. Essas condições referem-se às condições de energização singela, energização solidária, sobre-excitações, rejeições de carga, saturação de TCs e remoção de faltas externas próximas à região de proteção. A origem e o impacto dessas situações são descritos na seção 2.5.

2.4. Causas do surgimento de correntes diferenciais indesejadas

A implementação da proteção diferencial em transformadores de potência visa evitar maiores danos ao equipamento devido ao surgimento de falhas internas do mesmo. Entretanto o relé diferencial pode ser sensibilizado e atuar de maneira indevida em certas situações que deveriam ser compreendidas por fenômenos que ocorrem fora da região de proteção como em falhas externas do TDP. Nessas situações de má interpretação por parte do relé diferencial, não se deseja que a proteção isole o TDP do SEP, pois elas não configuram faltas internas no TDP. Nestes casos, é eminente que os estudos a respeito de tais circunstâncias tenham profundidade

para que seja possível discriminar efetivamente tais condições especiais de operação de condições de falta interna. Dissertam-se nessa seção as seguintes situações possíveis de má interpretação do relé diferencial:

- Energização de TDP: fenômeno caracterizado pelo surgimento de correntes de magnetização, também denominado correntes de *inrush*, impactando nos valores das correntes diferenciais;
- Energização solidária de TDP: fenômeno caracterizado pela energização de um TDP conectado em paralelo a outro em condições normais de operação de tal forma que o surgimento das correntes de *inrush* influenciam a operação do TDP em estado normal de operação;
- Sobre-excitação do transformador de potência: fenômeno caracterizado pelo aumento da densidade do fluxo magnético em decorrência de sobretensões ou variação na frequência do SEP ocasionando a saturação do núcleo magnético do TDP;
- Remoção de faltas externas próximas ao transformador: fenômeno caracterizado pelo surgimento de correntes de magnetização em decorrência de transitório provocado da remoção de falta próxima ao TDP;
- Saturação de TCs: fenômeno ocasionado por altas correntes que percorrem os TCs decorrentes de fenômenos de falta interna ou externa;
- Rejeição de carga: aparecimento de correntes transitórias decorrentes da variação da frequência do SEP.

2.4.1. Corrente de magnetização durante a energização dos transformadores de potência

A avaliação sobre o fenômeno de energização do TDP é de suma importância para o desenvolvimento de filosofias de proteção, por corresponder ao principal fenômeno responsável pelo aparecimento de correntes de magnetização ou também denominadas correntes de *inrush.* A justificativa para a preocupação com esse fenômeno decorre do fato da corrente de magnetização ser capaz de alcançar valores entre 8 e 10 vezes segundo [10], 6 e 8 vezes segundo [14], 10 e 20 vezes segundo [3] a corrente nominal durante a energização do transformador e em regime permanente de 1 a 2% da corrente nominal [4].

A corrente de magnetização corresponde a um evento transitório que pode durar alguns ciclos de onda até que se atinja o regime permanente do fenômeno de energização do TDP. A corrente de magnetização *inrush* ocorre em decorrência da relação entre o fluxo residual e o instante do valor da tensão instantânea aplicado ao TDP.

A Figura 2.3 apresentada em [14] ilustra o comportamento de um núcleo de um TDP cujo circuito elétrico é interrompido no instante *t1* e religado no instante *t2* onde se observa o aparecimento da corrente de *inrush*.

Quando o transformador é desenergizado em *t1*, a não linearidade entre a densidade de fluxo magnético e a intensidade do campo magnético, ocasionada pelo ciclo de histerese, leva a corrente de magnetização até o zero conforme se apresenta na Figura 2.4 (Ponto R), enquanto a densidade de fluxo segue para um valor residual Br. Na Figura 2.3 apresenta-se o instante em que a curva de corrente magnetização é interrompida e o fluxo residual é estabelecido. Caso o transformador não fosse desenergizado, as ondas de corrente e de densidade de fluxo teriam seguido as curvas tracejadas. Entretanto como ocorreu a desenergização elas se apresentam pelas linhas sólidas, sendo a corrente em zero e a densidade de fluxo em $+B_r$, respeitando o comportamento do fluxo magnético em que em um circuito indutivo não pode sofrer variações abruptas de magnitude.

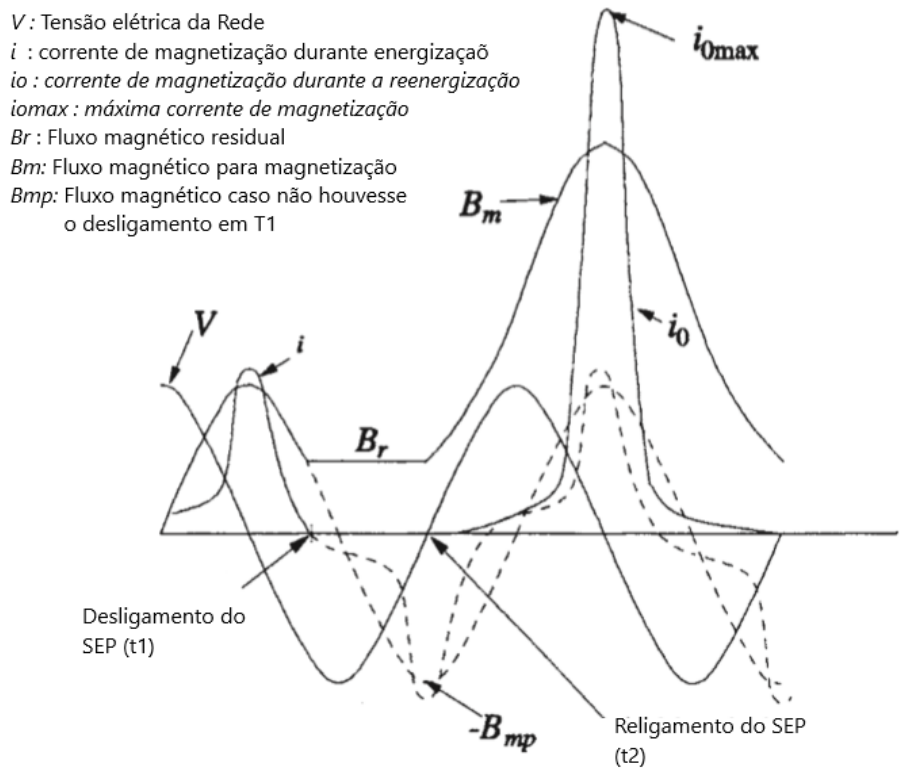


Figura 2.3 - Produção de corrente de *inrush* em um transformador (Retirado de [14])

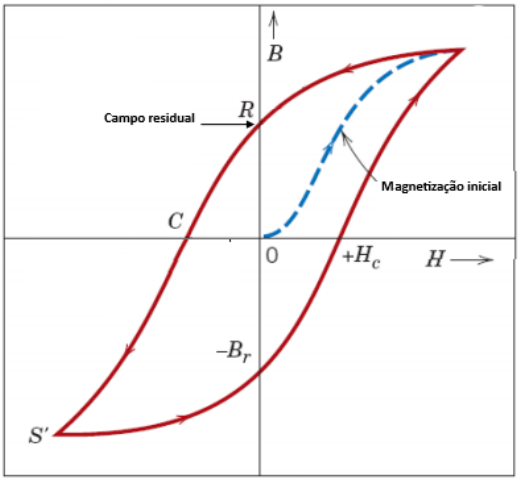


Figura 2.4 – Curva de Histerese *B x H* (adaptado de [25])

O circuito é energizado novamente no instante *t2* indicado pela Figura 2.3 quando a densidade de fluxo estaria normalmente em seu valor negativo (*-Bmax*). Como o fluxo magnético não pode ser eliminado instantaneamente, a onda de fluxo ao invés de partir com seu valor normal e crescer segundo a linha tracejada, parte do fluxo residual *Br* e chega ao valor positivo máximo de ($B_r + 2Bmp$), correspondente ao dobro do fluxo máximo adicionado ao residual B_r [14]. Essa característica provoca a saturação do núcleo magnético do transformador de potência e consequentemente o surgimento da corrente de *inrush* necessária, conforme ilustrado na

Figura 2.5 e pode ser obtida resolvendo a equação(2.5) [14]:

$$V_p sen(\omega t + \theta) = i_0 R_1 + N_1 \frac{d\emptyset_m}{dt} \quad (2.5)$$

Onde

V_p:tensão de pico da tensão senoidal aplicada;

θ: ângulo de chaveamento da tensão senoidal aplicada;

i_o: valor instantâneo da corrente de magnetização;

$\emptyset_m$: valor instantâneo do fluxo magnético no instante t;

R_1: resistência no enrolamento primário;

N_1: número de espiras no enrolamento primário.

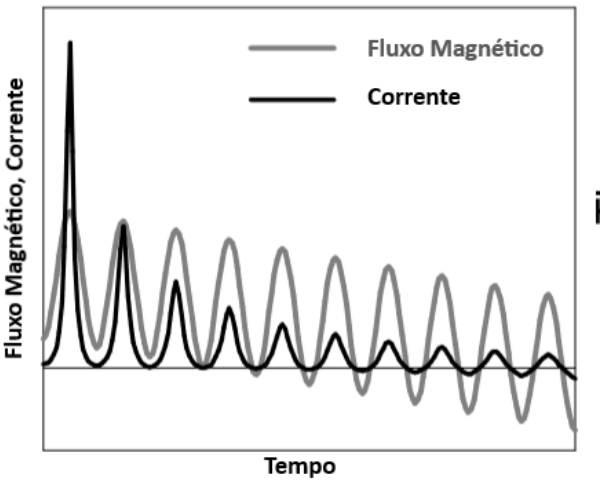


Figura 2.5 - Corrente de magnetização e fluxo magnético (Retirado de [26])

Considerando as condições iniciais $t = 0$ e $\emptyset_m = \pm\emptyset_r$, a resposta da equação diferencial da equação (2.5) é apresentada a seguir pela equação (2.6).

$$\emptyset_m = \left(\emptyset_{mp}\cos\theta \pm \emptyset_r\right)e^{-\frac{R_1}{L_1}t} - \emptyset_{mp}\cos(\omega t + \theta) \tag{2.6}$$

O termo transitório da solução apresentada pela equação (2.6) dada pela expressão $\left(\emptyset_{mp}\cos\theta \pm \emptyset_r\right)e^{-\frac{R_1}{L_1}t}$ representa o fluxo de magnético do TDP detectada pela primeira vez por Fleming em 1892 [27] que decai a uma taxa determinada pela razão entre resistência (R_1) e a indutância do enrolamento primário (L_1) do TDP, e o termo particular em regime permanente é representado pela expressão $\emptyset_{mp}\cos(\omega t + \theta)$.

Aclara-se que a situação acima apresentada onde se observa a energização do transformador de potência com fluxo magnético residual corresponde a situação de máxima corrente de *inrush* (polaridade e magnitude do fluxo residual oposto à polaridade e magnitude do valor instantâneo do fluxo de regime permanente). Nesse sentido, uma das formas de minimizar o efeito da corrente de *inrush* consiste em energizar o TDP no instante em que a polaridade e amplitude do fluxo magnético residual corresponder à polaridade e amplitude do fluxo magnético de regime permanente. Assim, o efeito do procedimento da energização é suavizado, não promovendo o aparecimento transitórios eletromagnéticos com amplitudes significativas.

Importante destacar os fatores que influenciam o aparecimento das correntes de magnetização, sua magnitude e duração. A seguir, se apresentam os principais fatores que tem influência sobre a corrente de *inrush* [14]:

a) **Ângulo de chaveamento**: A corrente de magnetização decresce com o aumento do ângulo de chaveamento (θ), isto é, a corrente de magnetização é máxima quando $\theta = 0^o$ e mínima quando $\theta = 90^o$, conforme se deduz da equação (2.6);

b) **Densidade de fluxo residual**: O fluxo residual presente no transformador depende das características do material do núcleo e do fator de potência da carga no momento que este foi desconectado da rede elétrica. Deste modo, verifica-se que quanto maior for o fluxo residual maior será a corrente de *inrush* gerada no instante de energização. Além disso, deve-se considerar também a polaridade do fluxo residual em relação ao fluxo de magnetização no momento de conexão do transformador à rede, dado que a mesma tem influência no valor de pico da corrente de *inrush* de tal forma que na eventualidade de ambos fluxos, residual e magnetização, estejam orientados na mesma direção a corrente de magnetização atingirá seu valor máximo, do contrário seu valor será mínimo;

c) **Nível de tensão da rede**: O nível de tensão da rede à qual o TDP é conectado tem uma influência direta na corrente de magnetização. Assim, quanto maior for o nível de tensão de alimentação do TDP, maior será o fluxo e, consequentemente, a corrente de magnetização, uma vez que o fluxo magnético é diretamente proporcional à tensão máxima.

d) **Resistência de série da linha de transmissão**: A corrente de magnetização é predominantemente influenciada pela resistência conectada em série com o TDP. Devido ao efeito de amortecimento conforme se observa pela equação (2.6), a resistência em série entre o transformador e a fonte não apenas reduz a corrente inicial máxima de partida, mas também acelera sua taxa de decaimento R/L. Esta característica explica, por exemplo, porque os transformadores próximos às unidades geradoras possuem, geralmente, uma corrente de energização com maior amplitude e tempo de amortecimento mais lento [3]. Adicionalmente ao efeito da resistência de série na magnetização do núcleo do TDP, a resistência de série comporta-se de modo inverso em condições energizações solidárias, conhecidas pela literatura como *Sympathetic inrush*, de tal forma que quando maior seu valor de resistência, maior será o efeito provocado pela energização solidária.

e) **Energização do TDP conectado a carga**: Se um transformador é energizado em condições de carga, os picos de *inrush* são afetados em certa medida pelo fator de potência da carga. Quando é ligado sob carga pesada com o fator de potência próximo à unidade, o valor de pico da corrente de *inrush* é menor e na medida que o fator de potência diminui (para atraso ou avanço), o pico de corrente de *inrush* é maior;

f) **Nível de saturação do núcleo**: A corrente de energização inicial é diretamente proporcional ao fluxo que circula fora do núcleo magnético, como por exemplo, pelo ar. Portanto, quanto mais saturado estiver o ferro presente no núcleo do transformador, maior será a porção do fluxo total que se fechará através do ar, tornando a corrente de magnetização maior [3];

g) **Modo de energização do transformador**: Se um transformador trifásico for energizado em apenas uma fase, a corrente de magnetização será inferior quando comparada à corrente correspondente a da sua conexão através de um disjuntor trifásico. Além disso, a corrente de energização em p.u do lado de Baixa Tensão (BT) do transformador é menor que a corrente de energização do lado de Alta Tensão (AT) [28].

Além dos fatores supramencionados, a corrente de magnetização será influenciada por aspectos físicos e estruturais como tamanho do transformador de potência e o tipo de material utilizado na construção do núcleo do TDP [10].

Na corrente de magnetização verificam-se todas as ordens de harmônicas, mas o destaque está nas 2ª e 3ª componentes harmônicas, que apresentam magnitudes muito maiores que as demais [19]. Nesse espectro de harmônicas, a componente DC ou *offset* sempre está presente na corrente de magnetização de um TDP, apresentando *offsets* diferentes para cada uma das três fases. Os valores das componentes DC também sofrem influência do fluxo residual presente em cada energização do transformador. Se no exato instante da energização do TDP o fluxo residual em alguma das fases coincide com um valor de fluxo magnético típico em regime permanente, então nessa fase especificamente não será observada a componente DC na corrente de magnetização apesar de os efeitos nas outras duas fases serem de aumento nos valores dessas componentes.

Na Tabela 2.1 estão fixados os valores de amplitude comuns para a análise harmônica de uma corrente de magnetização.

Tabela 2.1 Concentração de harmônicas da corrente de magnetização proporcional a componente fundamental (Retirado de [23])

Componente	Valor Típico [%]
Fundamental	100,0
2ª Harmônica	63,0
3ª Harmônica	26,8
4ª Harmônica	5,1
5ª Harmônica	4,2
6ª Harmônica	3,7
7ª Harmônica	2,4

A assinatura das correntes de magnetização em transformadores trifásicos apresenta formas de onda das fases compostas por pulsos unipolares e bipolares separados por intervalos de corrente muito baixas conforme se observa pela Figura 2.6.

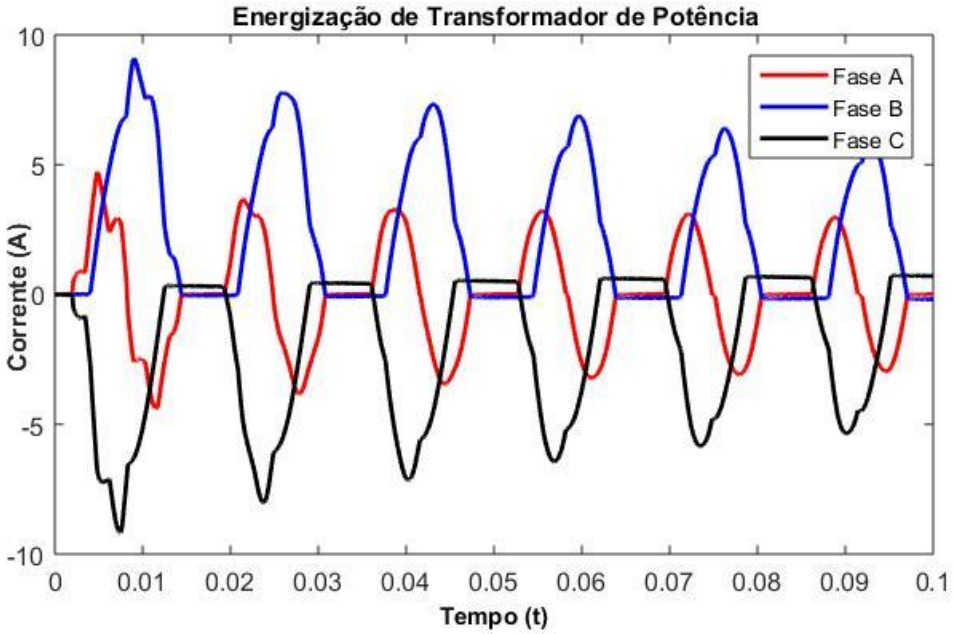


Figura 2.6 - Correntes de magnetização durante a energização de um transformador de potência

No contexto da proteção diferencial, o surgimento e impacto da corrente de magnetização constitui um grande entrave pois o processo de energização do transformador ocorre com carga a vazio, isto é, seu lado secundário está desconectado do restante do circuito (sem carga). Dessa forma, a corrente circulante no enrolamento secundário do TDP é nula, enquanto a corrente no enrolamento primário é elevada devido à energização. No contexto da

implementação da proteção diferencial percentual, a corrente diferencial calculada conforme equação (2.1) atinge valores superiores à corrente de restrição calculada segundo a equação (2.2). Por esta razão o relé poderá ser sensibilizado enviando a condição de *trip* ao disjuntor associado, causando uma operação indevida. Nesse sentido, faz-se então necessário prover a proteção diferencial da habilidade de distinção entre uma corrente de magnetização decorrente do processo de energização e a de corrente de curto-circuito decorrente de um distúrbio interno à zona de proteção do TDP.

Alguns dos métodos utilizados para evitar uma falha operacional do sistema de proteção diferencial de TDP são [10]: supervisão através de relés de tensão, temporização do relé diferencial (*time delay*), diminuição da sensibilidade do relé diferencial durante o instante de energização e restrição ou bloqueio das componentes harmônicas já que as correntes de curto-circuito não apresentam grande concentração de harmônicas. Entretanto, essas metodologias tornam a atuação do relé diferencial mais lenta em condições de falta interna, devido aos atrasos dos filtros utilizados para a restrição dos harmônicos e pela temporização do relé de tensão associado ao relé diferencial [8]. Além disso faltas internas ao transformador, em alguns casos, podem apresentar conteúdos harmônicos de 2ª ordem, levando a não atuação do relé diferencial com restrição por harmônicos comprometendo a segurança, continuidade e conservação do SEP.

2.4.2. Outras situações de aparecimento de correntes de magnetização no transformador de potência

Embora a energização do transformador seja a causa típica das correntes de magnetização *inrush*, quaisquer transitórios eletromagnéticos que circundam o TDP podem provocar o aparecimento de correntes de magnetização tais como nos fenômenos associados a sobre-excitação do núcleo e energização solidária de um TDP, remoção de faltas externas próximas à região de proteção e rejeição de carga, situações essas descritas nos itens subsequentes. A seguir são explicitados fenômenos que influenciam direta ou indiretamente o aparecimento de correntes de magnetização no TDP.

2.4.2.1. Remoção de faltas próximas ao transformador

Quando uma falta externa e próxima ao transformador é removida, surge uma situação similar àquela encontrada durante a energização do transformador [5].

A remoção da falta externa localizada próxima ao transformador gera um transitório em decorrência da variação abrupta de tensão passando de um valor de falta para um de pós-falta. O fluxo magnético por consequência comporta-se da mesma maneira segundo o fato que o fluxo concatenado muda em função da variação da tensão. Dependendo do instante e da característica da falta, o transitório provocado pela remoção de falta pode levar o núcleo do TDP à saturação. Deste modo, as formas de onda de corrente serão similares às correntes de *inrush* obtidas durante o processo de energização do transformador.

É importante salientar que não existe fluxo magnético remanescente no núcleo durante esse processo de remoção de faltas próximas ao transformador, então, a magnitude da corrente gerada é, geralmente, menor que a magnitude da corrente durante a energização do transformador [9].

2.4.2.2. Rejeição de Carga

A rejeição de carga está intimamente ligada com a frequência e a tensão do SEP e durante as rejeições de carga o transformador pode ficar exposto a sobretensões em regime permanente. O sistema idealmente comporta-se com uma frequência fundamental de 60 Hz e com tensões adequadas dentro de uma região de 0,95 a 1,05 p.u. A potência mecânica de entrada do eixo do gerador é igual à soma das cargas conectadas a este somadas ainda as perdas de potência reais no sistema [4].

Para garantir esses níveis de qualidade, o Sistema Interligado Nacional (SIN)[9] opera alterando a potência mecânica na entrada do eixo do gerador. Dessa forma, tem-se que a massa rotacional do rotor (turbina e gerador) atua como um depósito de energia cinética. Logo, quando existe potência mecânica insuficiente na entrada do sistema (como por exemplo, em função de um aumento de carga), o rotor diminui de velocidade, suprindo energia para o sistema [29]. De modo oposto, quando há um excesso de potência mecânica na entrada do sistema, ou seja,

[9] O sistema de produção e transmissão de energia elétrica do Brasil é um sistema hidro-termo-eólico de grande porte, com predominância de usinas hidrelétricas e com múltiplos proprietários, coordenado pelo Operador Nacional do Sistema (ONS).

redução considerável de carga, este acelera, absorvendo energia. Sendo assim, qualquer mudança na velocidade causa uma variação proporcional à frequência [4].

Analisando-se a situação de rejeição de carga e estabelecendo uma correlação com o transformador é possível compreender as consequências desse fenômeno para a proteção diferencial. Em geral, os transformadores operam perto do "joelho" da curva de saturação do núcleo magnético; qualquer variação na tensão ou na frequência nos terminais do transformador tem como consequência um aumento no fluxo magnético que percorre o núcleo, podendo elevar a temperatura no equipamento [10]. O transformador nessas condições pode ficar exposto a harmônicos de 3° e 5° ordem, apresentando correntes diferenciais indesejáveis e por fim sensibilizando a proteção diferencial de forma indevida [3].

A equação (2.7) a seguir relaciona o fluxo em função da tensão (V), frequência (f) e de uma constante de proporcionalidade (k), a qual é definida em função dos parâmetros do sistema [4].

$$\emptyset_m = k\left(\frac{V}{f}\right) \tag{2.7}$$

Como visto anteriormente pela equação (2.7) as consequências do fenômeno de rejeição de carga são similares às das condições de sobre-excitação, fenômeno descrito no item 2.4.2.4 pois se relacionam com a variação da frequência da rede. Portanto, a proteção diferencial deve, da mesma forma, detectar condições de rejeição através da detecção das componentes harmônicas de ordem 3ª e 5ª.

2.4.2.3. Energização solidária de transformadores de potência

O termo energização solidária, *sympathetic inrush*, refere-se à condição de energização de transformadores que estão operando em paralelo. Nessa condição, as correntes de energização para ajuste dos relés de proteção são calculadas assumindo-se que os transformadores encontram-se operando isoladamente, ou seja, suprindo energia à carga sem ajuda de outro transformador conectado em paralelo [3].

A conexão de transformadores em paralelo é uma técnica importante em SEP que tem por objetivo oferecer maior confiabilidade ao fornecimento de energia. Porém, a energização

desses equipamentos em paralelo com os demais dispositivos, gera transitórios e sobretensões nos transformadores próximos [30].

A situação de energização de transformador em paralelo com outro é apresentado na Figura 2.7. O transformador Tr_1 encontra-se energizado e o transformador Tr_2 desenergizado. Quando a chave Ch_2 é fechada inicia-se o processo de energização do transformador Tr_2 e por consequência surge uma corrente de magnetização (*inrush*) nos enrolamentos no primário dele. A corrente *inrush* possui uma componente DC que é atenuada ao longo do tempo, produzindo uma queda de tensão na linha de transmissão segundo o decaimento exponencial conforme a mesma equação (2.6) para fenômenos de energização. Essa queda de tensão produzida pela componente DC forçará o transformador já energizado, Tr_1, produzir um fluxo de magnetização com sentido oposto ao fluxo do transformador que está sendo energizado, fazendo com que surjam correntes de magnetização no transformador Tr_1 [31].

Mesmo com a corrente produzida pela energização solidária sendo menor que a corrente de *inrush* em termos de magnitude, seu comportamento ondulatório é similar, podendo levar a sistema de proteção diferencial à falha operacional. [32].

A duração e a amplitude das correntes de energização solidária são influenciadas por diversos parâmetros do SEP dentre os quais se destacam [33] [34]:

- Resistência série equivalente do SEP;
- Ângulo de chaveamento do transformador que está sendo energizado;
- Nível de carregamento do transformador em operação;
- Fluxo residual no transformador que está entrando em operação;
- Existência de capacitor *shunt* no sistema ao qual o paralelismo está sendo utilizado.

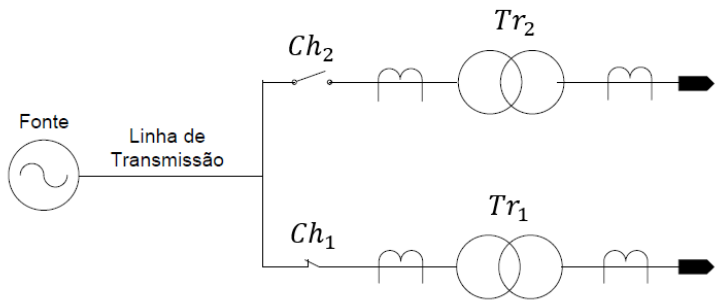


Figura 2.7 - Energização solidária (adaptado de [32])

2.4.2.4. Sobre-excitação do transformador

O fluxo de magnetização dentro do núcleo é diretamente proporcional à tensão aplicada e inversamente proporcional à frequência do sistema, conforme descreve-se a equação (2.8). Portanto, situações de sobretensão e sub-frequência podem produzir variação de fluxo magnético do transformador acarretando na saturação do núcleo do mesmo. Tais situações anormais de operação podem ser caracterizadas em qualquer parte do sistema elétrico, expondo os equipamentos conectados ao transformador [4].

$$V = 4{,}44 \cdot n \cdot \emptyset \cdot f \tag{2.8}$$

Observa-se que as condições de sobre-excitação impactam os transformadores através de mudanças de temperaturas e aumento tanto na corrente de excitação quanto em ruídos e vibrações. Em casos onde a magnitude desse fenômeno é elevada, recomenda-se a desconexão do transformador do SEP a fim de evitar danos maiores. O relé para casos em que ocorre a excitação anormal do transformador apresenta dificuldades em controlar a tolerância do mesmo em relação a essa condição pois, o transformador não apresenta a capacidade de compreender em qual limiar de temperatura é desejável sua atuação, sendo assim tem-se uma condição indesejável no desempenho do relé.

Quando há sobre-excitação, o transformador é submetido a um comportamento não-linear das correntes ante a variação de fluxo. Como consequência, ocorrem distorções de 3º e 5º harmônicos, propiciando o surgimento de correntes diferenciais indesejáveis no relé.

2.4.3. Saturação dos TCs

O consumo sempre ascendente de energia elétrica e a capacidade do sistema em atender altas demandas de energia elétrica provocam consequentemente, maiores magnitudes de corrente de falta. Dessa forma, os relés de proteção e equipamentos de medição passam a desempenhar um papel importante na garantia de confiabilidade e qualidade do sistema. Nesse aspecto, os TCs são empregados com o objetivo de fornecer uma redução das correntes primárias, bem como a isolação galvânica entre o sistema elétrico e o relé diferencial. Os TCs são construídos de forma a suportar correntes de falta e outros fenômenos por poucos segundos,

os quais podem alcançar valores maiores que 20 vezes a magnitude da corrente nominal de carga [5] .

Na proteção diferencial, os TCs devem garantir que a corrente no lado do secundário seja a reprodução do seu lado primário. Embora as tecnologias dos TCs atendam satisfatoriamente bem o sistema de proteção diferencial deve considerar erros de transformação através da inclinação do relé percentual.

Quando faltas ocorrem, além dos valores de corrente atingirem níveis elevados, podem conter substanciais parcelas de componente contínua e, ainda, pode haver fluxo magnético remanescente no núcleo do TC. Esses fatores contribuem para saturação do núcleo do TC e produção de uma distorção considerável na forma de onda de corrente do dispositivo. Com a probabilidade da corrente secundária do TC não representar adequadamente a corrente primária, a eficiência da proteção fica comprometida e aumenta-se a probabilidade de o relé operar incorretamente.

As Figuras 2.8 e 2.9 apresentam os resultados de uma simulação desenvolvida no programa ATP que mostra um caso de falta interna considerando um TC ideal e um TC com saturação, em que é possível visualizar as distorções produzidas pelo TC.

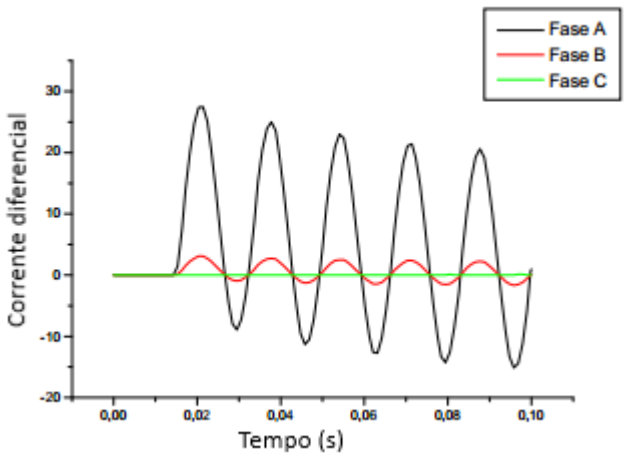


Figura 2.8 - Caso de falta interna sem a saturação do TC (retirado de [35])

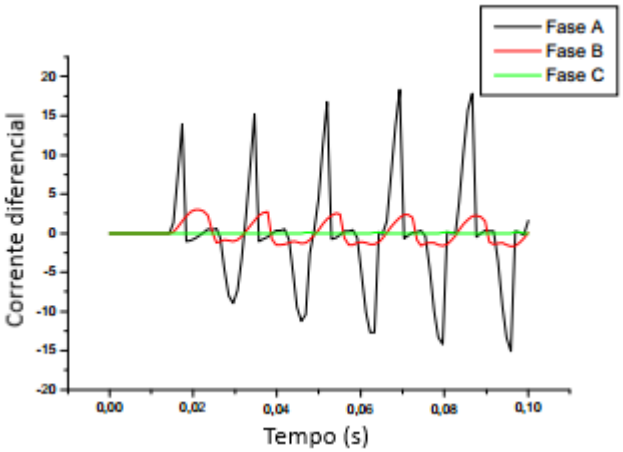


Figura 2.9 - Caso de falta interna com saturação de TC (retirado de [35])

Quando há presença de saturação nos TCs, conforme apresentado pela Figura 2.8 e pela Figura 2.9, pode ocorrer em relação ao relé:

- Em faltas externas, falsas correntes são obtidas devido às ondas distorcidas no secundário do TC com núcleo saturado, resultando em operação indevida da função;
- Em faltas internas, os harmônicos gerados pela saturação podem retardar o envio do sinal e a distorção pode fazer com que a corrente diferencial encontre-se na região de restrição, ou seja, região de não atuação [36].

2.5. Considerações finais

A proteção diferencial percentual corresponde à filosofia de proteção diferencial amplamente aplicada em TDP, cujo princípio de funcionamento se baseia no cálculo e análise das correntes de restrição e diferencial. As correntes são determinadas a partir de medições oriundas dos TCs conectados nos enrolamentos do TDP. O relé diferencial percentual opera, ou seja, envia a condição de *trip* ao disjuntor associado a partir do instante que a corrente diferencial supera o produto entre corrente de restrição e um fator de *K* de sensibilidade do sistema estipulado em projeto. Essa filosofia é notoriamente tida pela literatura como eficaz quando os fenômenos se restringem a distúrbios internos e externos ao TDP, mas quando as situações se ampliam para eventos com transitórios eletromagnéticos inerentes à operação do TDP e do SEP observa-se o surgimento de correntes diferenciais indesejáveis. Essas correntes podem conduzir o relé diferencial à operação inadequada, isto é, o relé envia a condição de *trip*

ao disjuntor quando o mesmo deveria permanecer em bloqueio por ser um evento transitório. As correntes diferenciais indesejáveis surgem principalmente devido ao aparecimento de correntes de magnetização em fenômenos de energização de TDP, remoção de faltas próximas ao transformador, rejeição de carga, energização solidária de TDP, sobre-excitação e em saturação de TCs.

Atualmente pratica-se no mercado a implementação dos métodos de restrição e de bloqueio de harmônicos a partir da transformada de Fourier. O princípio de funcionamento é baseado nas correntes de magnetização que apresentam grandes magnitudes para componentes de harmônicas 2ª, 4ª e 5ª ordem, característica praticamente incomum em distúrbios internos no TDP. No entanto a adoção desta técnica pode eventualmente ignorar faltas internas com componentes de segunda harmônica, condição particular na ocorrência de saturação dos TCs decorrente de faltas internas severas e pela presença de capacitância *shunt* para ajuste de fator de potência em linhas de transmissão [6], o que provocaria uma perda irreparável do transformador de potência em razão do sistema de proteção não atuar quando deveria.

Na intenção de mitigar erros operacionais que não comprometam a segurança e a continuidade do SEP, observa-se pela literatura consultada o esforço de profissionais da área de proteção em aprimorar a proteção diferencial percentual, de tal forma que a filosofia de proteção seja capaz de distinguir correntes de magnetização de faltas internas de modo confiável e célere. Dentre as propostas, observa-se pela literatura uso de ferramentas matemáticas empregadas no processamento de sinais como a Transformada *Wavelet* , técnica utilizada neste trabalho e em [3], [6] [9], [19]**,** [37], [38], [39], [40], e [41] , transformada de Clarke [42], redes neurais artificiais [43] [35]e lógica *fuzzy* [44] [45], bem como outras técnicas de processamento de sinais.

Capítulo 3 - Transformada *Wavelet*

Este capítulo apresenta os desafios da proteção diferencial em transformadores de potência, dissertando sobre as técnicas de processamento de sinais, transformada de Fourier amplamente na prática e a transformada Wavelet, técnica proposta neste trabalho.

3.1. Introdução

A transformada *Wavelet* (TW) recorrentemente é citada pela literatura como ferramenta com capacidade de resolução de problemas que até então não eram possíveis de serem solucionados a partir de técnicas tradicionais. Especialmente em TDP onde o desafio da proteção diferencial surge em decorrência de transitórios eletromagnéticos como saturação dos TCs, sobre-excitação e energização do TDP, a análise dos sinais a partir da transformada *Wavelet* mostra-se eficaz ao permitir avaliação do fenômeno detectado tanto no domínio do tempo como no domínio da frequência.

A formulação matemática da transformada *Wavelet* é da década de 80, em que Grossmann e Morlet em [40] propuseram a transformada a partir da transformada de Haar, proposta em 1910 [41]. A partir de sua concepção, a transformada obteve contribuições [42] em que apresentou o conceito da Transformada *Wavelet* Discreta (TWD), e de Mallat [43] que introduziu o conceito matemático para a análise multi-resolução (AMR) de sinais, que utiliza da TWD para decomposição do sinal em diferentes níveis de frequência.

Por permitir análise de sinais no domínio do tempo e na frequência, a transformada *Wavelet* se torna uma ferramenta matemática adequada para análise de transitórios presentes em transformadores de potência, os quais são ricos em componentes de alta frequência e de curta duração, de modo que por meio da transformada é possível discriminar fenômenos internos de fenômenos especiais associados a transitórios eletromagnéticos.

Apresentam-se neste capítulo as seguintes temáticas: revisão bibliográfica, o desafio da proteção diferencial em TDP, a transformada *Wavelet*, análise multi-resolução e cálculo da energia das componentes *Wavelets*.

3.2. Revisão bibliográfica

Disserta-se a seguir sobre os principais trabalhos apresentados pela literatura consultada que implementaram algoritmos digitais que corroborassem na melhoria da proteção de transformadores.

Em [3] desenvolve-se algoritmo com objetivo de aprimorar o desempenho da proteção diferencial convencional a partir da utilização da TWD para decomposição da corrente diferencial em 5 faixas de frequências distintas associadas às diferentes condições de operação do TDP. Para cada faixa de frequência foi calculada a energia espectral dos coeficientes *wavelet* de detalhe para discriminação e classificação dos distúrbios. O algoritmo submetido a condições de faltas internas repentinas, faltas externas, energização, energização com falta interna, energização com falta externa, energização solidária, sobre-excitação, saturação de TCs e faltas internas entre enrolamentos obteve 97,2% de assertividade em sua operação.

Em [44] o esquema de proteção diferencial de TDP foi baseado na Transformada *Wavelet* Discreta Redundante (TWDR) a fim de discriminar corretamente faltas internas de faltas externas e condições de energização. Nesse método, adotou-se como critério para discriminação dos eventos a energia espectral dos coeficientes *wavelet* com bordas das correntes diferenciais de operação e de restrição.

Em [33] propõe-se um método que recria a função diferencial usando um detector de distúrbios, por meio das energias dos coeficientes *wavelet*, o qual habilita as funções diferenciais neuro-wavelet de fase e sequência negativa, que são baseadas em máquinas de vetor de suporte (*Support Vector Machine* - SVM). O método proposto conta ainda com um classificador de falta interna, também baseado em SVM, para realizar a classificação do tipo de falta e auxiliar na lógica de *trip* do relé.

Em [29] apresenta-se alternativa para melhoria do desempenho da proteção de TDP utilizando a lógica diferencial associada ao uso das Redes Neurais Artificiais (RNAs). A RNA empregada utilizou o método de treinamento *backpropogation.* A lógica do algoritmo consiste em aplicar o processamento da RNA quando a corrente diferencial superar a corrente de restrição associado a um valor *K* pré-ajustado.

Em [45] tem-se um algoritmo híbrido associado a transformada de Clarke com a lógica fuzzy para discriminação falhas internas de outras condições de operação do TDP. O pré-processamento do relé e cálculo das correntes diferenciais a partir das correntes dos TCs foi realizado por meio da transformada de Clarke e a partir de sua saída foi definido estrutura *fuzzy*

para avaliação do sinal. O algoritmo apresentou tempo médio de operação menor que o verificado em relés diferenciais convencionais, provou-se ser simples e eficaz com exceção apenas em faltas espira-terra.

Em [46] apresenta-se abordagem que associa a TW com a RNA para classificar fenômenos transitórios em TDPs. A TW é aplicada para decomposição do sinal da corrente diferencial em uma série de detalhes de componentes *wavelets*. A energia dos coeficientes *wavelets* é obtida para que seja parâmetro de entrada e treinamento da RNA para classificação de distúrbios.

Em [47] também combina a utilização da TW com RNA para classificação de diferentes condições de operação (normal, *inrush*, sobre-excitação, saturação de TCs e faltas internas). O esquema de proteção proposto foi realizado através de duas arquiteturas de RNA, uma utilizada como Detector de Falhas Internas (IFD) e a outra utilizada como um Monitor de Condição (CM). Essas duas arquiteturas foram treinadas utilizando o BPN (*Back Propagation Algorithm*) atuando sozinho e combinando o BPN com a TW de modo que a rede neural pudesse reconhecer e classificar todas as condições de operação preconizadas.

Em [6] propõe-se a associação de técnicas de processamento de sinais, nessa utilizando-se a TW junto a um Sistema de *Interface Fuzzy* baseado em circuitos adaptados para discriminação de correntes *inrush* de faltas internas do TDP. O sistema *fuzzy* necessitou de conjunto de dados primários para treinamento para definição dos parâmetros adaptativos e o número entradas.

Em [9] apresenta-se um algoritmo digital que corrobora na operação dos relés de proteção a partir da TW. Decompõe-se o sinal da corrente diferencial em coeficientes wavelets de detalhe e de aproximação para posterior cálculo da energia espectral de sua série de dados. A partir do cálculo da energia espectral das componentes do 1º detalhe discriminou-se os distúrbios em falta interna e *inrush* ou falta externa. O algoritmo compara a performance na utilização de três *wavelets mãe* para processamento do sinal, Daubechies, Symlet e Haar, destacando-se a família de Daubechies com eficácia em 90% dos casos simulados. Adicionalmente a comparação das *wavelets mãe*, algoritmo proposto é confrontado com análise tradicional de Fourier, nessa linha os resultados utilizando a TW foram superiores nos casos de faltas internas contendo correntes de *inrush* e em correntes de *inrush.*

Em [31] propõe-se metodologia de proteção diferencial para TDP baseada na análise da energia espectral de determinados detalhes da TW, aumentando a confiabilidade do relé de proteção diferencial convencional.

Destaca-se dentre as técnicas de processamento de sinal a utilização da TW como ferramenta para extração de informações do sinal a partir do cálculo da energia espectral dos coeficientes *wavelet* de detalhe como critério de discriminação de faltas internas, externas e condições especiais de operação como *inrush*. Um outro ponto de destaque corresponde a adoção da TW como mecanismo que corrobore na classificação de distúrbios por meio de técnicas de inteligência artificial como RNA, *fuzzy* e SVM.

3.3. Desafio da proteção de diferencial em transformadores de potência

É inegável discordar da efetividade da aplicação dos relés diferenciais na proteção de transformadores de potência quando o assunto se restringe a avaliação de fenômenos internos e externos do sistema de proteção do SEP. Contudo, quando a discussão se amplia para avaliação de fenômenos especiais caracterizados pelo aparecimento de correntes de *inrush* e outras particularidades, a adoção singela de relés diferenciais nos enrolamentos primário e secundário do TDP não se mostra suficiente para discriminar fenômenos internos de fenômenos especiais, ocasionados por transitórios eletromagnéticos do sistema.

O efeito da corrente de *inrush* decorrente de energizações e de sobre-excitações devido a remoção de falta externa próxima à região de proteção evidencia a necessidade de considerar o emprego de técnicas de proteção que permitam distinguir as mencionadas condições especiais. As correntes de *inrush* resultam em valores entre 6 e 20 vezes maior que a corrente nominal [10, 14, 3], superiores aos valores das correntes de plena carga e, portanto, podem provocar nos relés diferenciais funcionamento inadequado ao atuar sobre indício de falta interna em função da magnitude dessa corrente se assemelhar ao comportamento intrínseco de correntes de falta interna. Distinguir correntes de falta interna de correntes de *inrush* tem sido um desafio notoriamente reconhecido pela literatura consultada em sistemas de proteção de transformadores [48]. Atualmente os sistemas de proteção em transformadores de potência empregam técnicas de processamento digital cuja avaliação se destaca por investigar o conteúdo de harmônicos do fenômeno em questão, seja restringindo o conteúdo das componentes harmônicas ou bloqueando a operação em decorrência de componentes harmônicas.

A transformada de Fourier aparece como uma das técnicas digitais amplamente empregadas em esquemas de proteção diferencial de transformadores de potência. Essa técnica permite bloquear a operação do relé diferencial ou restringir conteúdo de harmônicas quando do surgimento de correntes de *inrush*, discriminando-a da condição de falta interna a partir do

conteúdo de segunda harmônica da corrente diferencial. Contudo, na medida em que os sistemas de transmissão aumentam tanto em complexidade quanto no nível de tensão e incrementa-se o uso de cabos subterrâneos, a produção de correntes de falta com um conteúdo de segunda harmônica comparável com as da corrente de *inrush* é cada vez maior [9]. Adicionalmente a esse fato, a transformada de Fourier apresenta um inconveniente na análise de distúrbios em SEPs, pois considera que o sinal de corrente possui natureza periódica e estacionária, quando em verdade os principais distúrbios em SEPs, incluindo a corrente de *inrush*, são aperiódicos, não-estacionários e de curta duração [31].

Um outro fato a se considerar é que as componentes de segunda harmônica em correntes de *inrush* tendem a ser pequenas nos transformadores modernos, dadas as melhorias no processo e na definição dos materiais para construção do núcleo do transformador de potência [9]. Constata-se assim que discriminar as correntes de faltas internas de correntes de *inrush* a partir do conteúdo da componente de segunda harmônica não se estabelece como parâmetro de alta confiabilidade.

Os fatores supracitados denotam a necessidade de cautela ao avaliar a operação do relé diferencial com o emprego de técnicas de restrição ou bloqueio de harmônicos por meio da transformada de Fourier, e evidenciam a busca por uma técnica de processamento digital que permita introduzir ao relé diferencial confiabilidade e segurança durante sua operação tal como a transformada *Wavelet* entre outras avaliadas na revisão bibliográfica deste trabalho.

3.4. Transformada Wavelet

As formas de onda associadas à transitórios eletromagnéticos caracterizam-se por apresentar sinais não-periódicos com oscilações de alta frequência e impulsos sobrepostos sobre a frequência fundamental da rede e suas harmônicas [9]. Essas características constituem um problema para análise de sinais na proteção diferencial de TDP quando a técnica de processamento de sinais empregada corresponde à TFJ, em função da mesma assumir que o sinal analisado é periódico e não respeitar o princípio de Heisenberg preconizado na seção anterior. Além disso, a janela de processamento da TFJ apresenta comprimento finito de dados, o que agrava a garantia de boa resolução para avaliação de condições normais com sinais de baixa frequência e de condições especiais com presença de transitórios eletromagnéticos de alta frequência. Assim, uma janela suficientemente estreita na qual o sinal seja estacionário fornece uma melhor resolução no tempo e, consequentemente, uma baixa resolução em frequência. De

forma oposta, quando se aplica uma janela mais extensa em comprimento garante-se boa resolução no domínio da frequência e fraca resolução temporal [3].

Surge, então, a necessidade de aplicar e desenvolver técnicas de processamento de sinais com capacidade de visualizar o fenômeno elétrico com multi-resoluções, tanto no domínio do tempo quanto no da frequência, a fim de assegurar a confiabilidade e eficácia na análise dos fenômenos elétricos aos quais o TDP é submetido. Dessa forma, a melhor forma de se representar um determinado sinal é considerar uma análise que perpasse pela investigação tanto no domínio do tempo quanto no domínio da frequência [49]. Nessa linha, a TW aparece como opção viável, pois permite analisar os fenômenos elétricos em diferentes resoluções a partir da decomposição do sinal em altas e baixas frequências. Diferentemente da TFJ, a TW possibilita representações locais do sinal no domínio do tempo e da frequência. A partir dela torna-se possível determinar o espectro de frequências de um sinal, como também determinar o instante em que essas frequências podem ser observadas ao se estabelecer a janela de processamento de sinais variável, também denominada como janela de Heisenberg em função do princípio da incerteza de mesmo nome, segundo a faixa de frequências do sinal analisado. Para efeito de comparação com a TFJ, observa-se pela Figura 3.1 que independentemente da faixa de frequência do sinal apurado, a janela de processamento a partir da TFJ é constante tanto para o domínio do tempo quanto para o domínio da frequência, enquanto que para TW notam-se janelas estreitas para apuração de sinais de alta frequência e janelas mais amplas para sinais de baixa frequência.

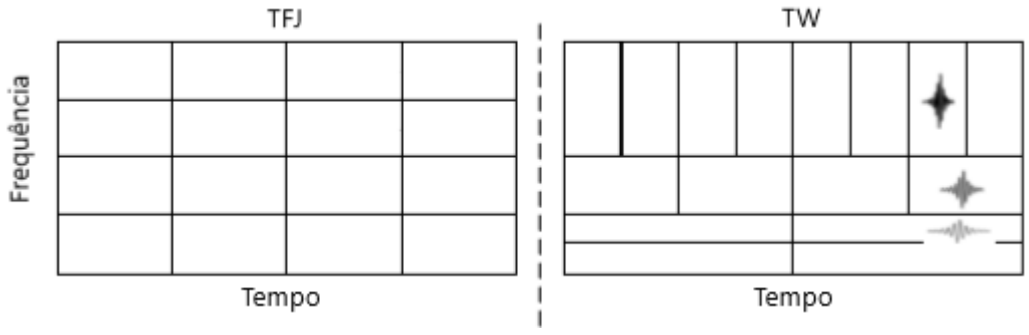


Figura 3.1 – Janelas de processamento de sinais no plano tempo x frequência da TFJ e da TW (Retirado de [9])

O método de processamento da TW com garantia de boas resoluções no domínio do tempo e da frequência dá-se a partir da decomposição tempo-frequência do sinal, o qual é sucessivamente dividido em coeficientes de aproximação e *wavelet* contendo diferentes conteúdos de frequência. A decomposição do sinal decorre da utilização de filtros passa-baixa

para obtenção dos coeficientes de aproximação e filtros passa-alta para obtenção dos coeficientes *wavelets*.

As transformadas *Wavelet* mais difundidas para processamento de sinais correspondem à Transformada *Wavelet* Contínua (TWC) e Transformada *Wavelet* Discreta (TWD). A diferença entre esses tipos está determinada pela forma em que os parâmetros de translação e escala são discretizados.

Assim como ocorre com as Transformadas de Fourier com função base apresentada pela equação (3.1), as transformadas *Wavelets* , TWC e TWD, são descritas em função de suas funções base, chamadas *Wavelets.* No caso da TW a frequência variável ω é substituída por um fator de escala variável *a* que representa o parâmetro de escala [9]. A variável de deslocamento no tempo τ é representada para a TW pela variável *b* que representa o parâmetro de translação [3]. Nessa linha, as *wavelets* são representadas matematicamente pela equação (3.2) .

$$w(t-\tau)e^{-j2\pi ft} \tag{3.1}$$

$$\psi^*_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \cdot \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \tag{3.2}$$

Utiliza-se a constante $1/\sqrt{a}$ para normalizar e garantir que a energia de $\psi^*_{a,b}$ seja independente do nível de dilatação da janela. As *wavelets* $\psi^*_{a,b}$ são derivadas a partir de operações de dilatação e translação da *wavele*t-mãe, ψ .

Há inúmeras *wavelets*-mães difundidas na literatura, tais como Haar, Daubechies, Symlets e Coiflets. A construção da *wavelets*-mãe deve satisfazer às seguintes condições:

- **Condição de admissibilidade:** a função deve ser contínua e apresentar média nula de seus valores para que seja possível introduzir o parâmetro de dilatação da janela e garantir a característica ondulatória. Esse princípio originou o nome *wavelet.* O termo original veio do francês *ondelette*, proposto pelo físico Alex Grosmann. A condição é representada matematicamente pela equação (3.3).

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t)dt = 0 \tag{3.3}$$

- **Condição de Energia Unitária:** Tal condição garante que a *wavelet* possua suporte compacto, ou tenha um decaimento rápido de amplitude (*e-folding time)*, conhecido como suporte efetivo, garantindo a localização espacial [50]. A condição é representada matematicamente pela equação (3.4).

$$\int_{-\infty}^{\infty} |\psi(t)|^2 dt = 0 \tag{3.4}$$

A partir da função base, $\psi^*_{a,b}(t)$, a Transformada *Wavelet* Contínua (TWC) é definida segundo a equação (3.5)

$$TWC(a,b) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot \psi^*_{a,b}(t) dt = \frac{1}{\sqrt{a}} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \tag{3.5}$$

Os fatores de escala[10] *a* e de translação[11] *b* são variáveis contínuas. Observa-se que o sinal unidimensional *x(t)* é transformado em uma nova função, um espaço bidimensional, em escala *a* e translação *b*. A TWC apresenta redundância na etapa de reconstrução do sinal em escala bidimensional, essa redundância implica em maior esforço computacional para cálculo das escalas e translações, restringindo dessa forma a utilização da mesma como alternativa para análise de transitórios eletromagnéticos em esquemas de proteção diferencial de TDP.

Uma alternativa a essa análise corresponde a discretização dos parâmetros de escala *a* e de translação *b* em potência de 2. A TWD é definida matematicamente a partir da equação

$$TWD(m,n) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot \psi^*_{m,n}(t) dt \tag{3.6}$$

onde *m* e *n* são números inteiros e $\psi^*_{m,n}(t)$ corresponde a função base utilizando os parâmetros de escala e translação de uma *wavelet* mãe, ψ.

Em [51] $\psi^*_{m,n}(t)$ é mostrada conforme equação (3.7) [51].

$$\psi^*_{m,n}(t) = \frac{1}{\sqrt{(a_0^m)}} \cdot \psi\left(\frac{t - nb_0a_0^m}{a_0^m}\right) \tag{3.7}$$

A TWD de um sinal discreto x[n] pode ser expressa pela equação(3.8) [52].

[10] Capacidade de uma dada *wavelet* mãe em mudar de escala dilatando ou comprimindo a mesma.

[11] Capacidade de uma dada *wavelet* mãe em se deslocar no eixo de tempo.

$$TWD(m,k) = \frac{1}{\sqrt{(a_0^m)}} \sum_n x(x) g\left(\frac{k - nb_0 a_0^m}{a_0^m}\right) \tag{3.8}$$

A *wavelet* mãe discretizada é representada pela função $g\left(\frac{k-nb_0a_0^m}{a_0^m}\right)$ e os parâmetros de escala *a* e translação *b* são dados em função de um parâmetro inteiro *m* com representação matemática apresentada em (3.9) e (3.10) [52, 21]. A partir desse parâmetro, concebe-se as *wavelets* filhas[12].

$$a = a_0^m \tag{3.9}$$

$$b = nba_o{}^m \tag{3.10}$$

Conforme preconizado, o processamento da TWD depende da função base, *wavelet mãe*, utilizada para o processamento dos sinais. Nesse sentido, a escolha da *wavelet mãe* é de grande importância para a análise do sinal e deve levar em consideração a semelhança entre o sinal avaliado e a função *wavelet*. Na Figura 3.2 apresentam-se alguns tipos de famílias de *wavelet* e suas características.

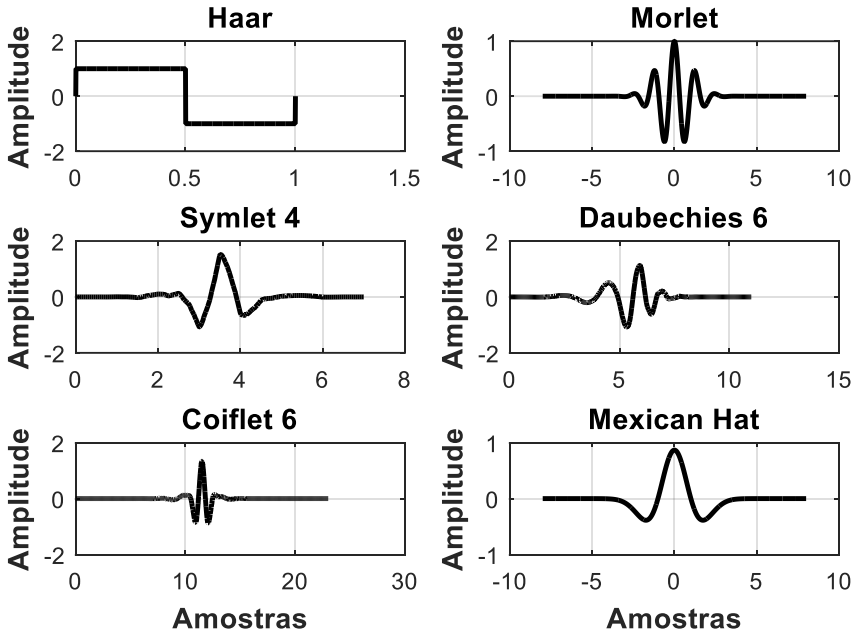


Figura 3.2 – Formas de ondas de *wavelets* mãe

A família de *wavelets* Daubechies corresponde a uma boa escolha para a maioria das situações encontradas em SEP, já que são geralmente melhores para identificar eventos com

[12] Correspondem à forma de ondas equivalentes às *wavelets* mãe transladadas no tempo e escalonadas em amplitude.

rápidas oscilações além de fenômenos transitórios [53]. Na metodologia proposta deste trabalho, em razão da eficácia das *wavelets* desta família frente as demais para proteção diferencial de TDP com mais de 90% de assertividade [3, 32] e também por se destacar em termos de desempenho na comparação com as demais, utilizou-se a família Daubechies para o processamento de sinal a partir da Transformada *Wavelet.*

3.5. Análise Multi-Resolução (AMR)

A garantia da TW de avaliação do sinal com boa resolução no domínio do tempo e no domínio da frequência para diferentes condições e em sinais com presença de alta frequência e baixa frequência, decorre da implementação da técnica desenvolvida por Mallat em 1989, denominada Análise Multi-Resolução (AMR) ou *Multiresolution-Analysis* (MRA). A AMR permite que a partir da TW o processamento de sinais extraia informações em diferentes faixas de frequência do sinal com boa resolução [54].

Na AMR, o sinal original é decomposto sucessivamente até a faixa de frequência de interesse a partir da implementação de filtros passa-baixas e passa-altas. Os filtros passa-baixa fornecem os coeficientes de aproximação (A) do sinal contendo as componentes de baixa frequência, enquanto os filtros passa-alta fornecem os coeficientes de detalhe (D) do sinal representando as componentes de alta frequência. A determinação das funções de transferência dos filtros passa-baixa ($L[n]$) e passa-alta $H(n)$ está associada as funções base da TW, uma função *wavelet* mãe $\psi(t)$ e uma função de escala[13] $\phi(t)$. A Figura 3.3 apresenta graficamente a função escala e *wavelet* mãe para Daubechies 6.

[13] Função de escala é dependente da definição da *wavelet* mãe e é ortonormal a ela.

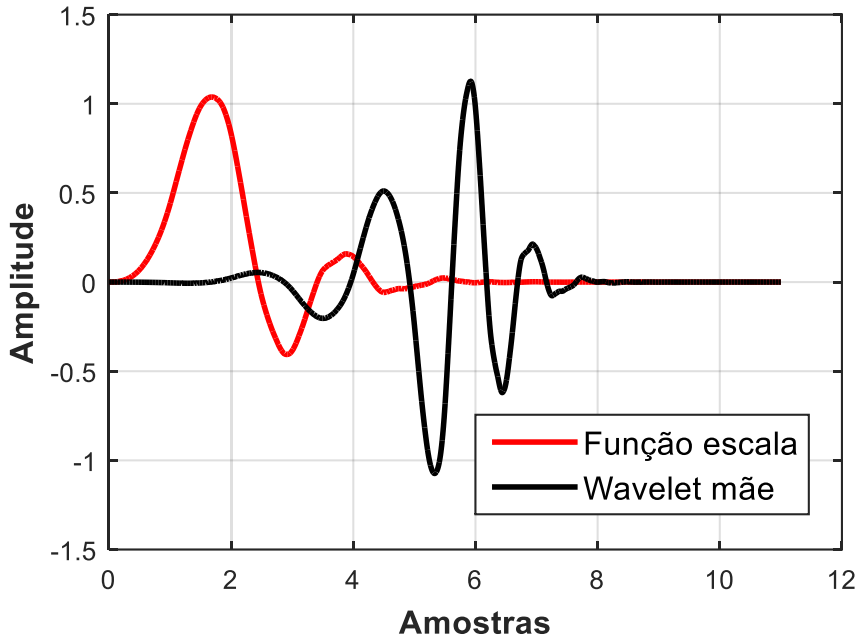


Figura 3.3 - Função de escala e *wavelet* mãe da Daubechies 6

Os sucessivos processos de filtragem do sinal a partir dos filtros passa alta e baixa ocorrem em função de operações de sub-amostragem. A operação de sub-amostragem consiste em reduzir a taxa de amostragem do sinal e eliminar metade das amostras para os coeficientes de aproximação e detalhe. Por exemplo, uma vez que o sinal tenha passado pelo filtro passa-baixa de meia onda, metade das amostras são eliminadas de acordo com o critério de Nyquist [9]. Nesse sentido, é eliminado uma de cada duas amostras (sub-amostragem de dois) para reduzir o número de pontos à metade e duplicar a escala do sinal.

Na Figura 3.4 ilustra-se o esquema de decomposição de um sinal S pela transformada *Wavelet* em que A_1, A_2, A_3 e A_4 correspondem aos coeficientes de aproximação do sinal e D_1, D_2, D_3 e D_4 são então as componentes de detalhe do sinal [34]. A frequência que cada coeficiente cobre depende também da frequência de amostragem do sinal, então para uma frequência de amostragem f_S, o primeiro detalhe da *wavelet* cobre conforme critério de Nyquist de $f_s/2$ até $f_s/4$, o segundo detalhe cobre de $f_s\ /4$ até $f_s/8$ e assim sucessivamente, até quantos detalhes forem necessários para se encontrar a faixa de frequência desejada para apuração do sinal [34].

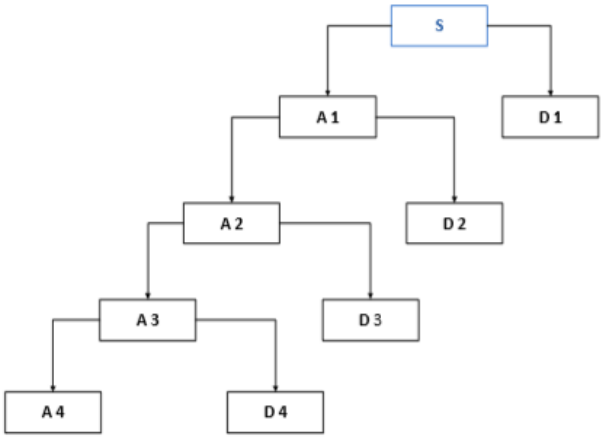


Figura 3.4 – Decomposição por AMR de sinal *s* a partir da TW (Retirado de [34])

A implementação em N níveis de decomposição do sinal se limita ao número de amostras do sinal apurado, o qual deve ser múltiplo da potência de 2 e ter tamanho mínimo equivalente a 2^N.

3.6. Cálculo da energia dos coeficientes *wavelet* para discriminação de dos eventos a partir da TW

Quanto a fundamentação teórica para discriminação entre eventos especiais associados aos transitórios eletromagnéticos do SEP e eventos com faltas internas no TDP a partir da TW, inúmeras são as técnicas que permitem extrair as características para diferenciar tais eventos. Na literatura consultada, destacam-se dentre essas técnicas o cálculo da variação da energia espectral dos coeficientes de detalhe e aproximação de cada nível de decomposição da técnica de AMR. Além dessas, apresentam-se técnicas que conjugam as vantagens da TW com ferramentas de inteligência artificial como, por exemplo, em [33] e [55] onde complementam a filosofia de proteção diferencial a partir da TW com utilização de RNA e topologia de SVM para classificação do sinais. Nessas apresenta-se a simples diferença com relação a entrada do algoritmo da RNA, em [55] as entradas correspondem aos coeficientes *wavelets* das correntes diferenciais enquanto que em [33] utiliza-se a energia dos coeficientes *wavelets* para detectar distúrbios e classificá-los.

Neste trabalho propõe-se como critério de caracterização dos distúrbios a variação de energia espectral dos coeficientes de detalhe da *wavelet* da corrente diferencial do TDP. A

energia de um sinal discreto *x[n]* corresponde a soma dos quadrados de seus valores a cada instante [5]. Dessa forma, a energia espectral é definida segundo a equação (3.11).

$$E = \sum_{-\infty}^{\infty} |x[n]|^2 \tag{3.11}$$

3.7. Considerações finais

O presente capítulo teve por objetivo destacar o desafio da proteção diferencial em transformadores de potência que corresponde a distinguir faltas internas de condições especiais, responsáveis por causar o surgimento de correntes diferenciais indesejáveis.

A TW foi apresentada como ferramenta robusta e consistente para análise de sinais estacionários e não-estacionários por permitir a análise dos fenômenos elétricos em diferentes resoluções a partir da decomposição do sinal em altas e baixas frequências. Diferentemente da TFJ, a partir da TW torna-se possível determinar o conteúdo de frequência de um sinal, como também determinar o instante em que essa frequência pode ser observada ao estabelecer janela de processamento de sinais variável segundo a faixa de frequências do sinal analisado. Ainda foi destacada a lógica operacional por trás da decomposição do sinal elétrico em diferentes faixas de frequência, a partir da implementação de filtros passa-baixa e passa-altas através da técnica de AMR.

Dissertou-se ainda sobre a variação de energia espectral das componentes *wavelet*, sendo na metodologia proposta deste trabalho fator para discriminação entre as condições especiais de transitórios eletromagnéticos e faltas internas.

Capítulo 4 - Modelagem do Sistema Elétrico de Potência

Este capítulo apresenta os modelos do sistema elétrico de potência aplicados neste trabalho para avaliação do sistema de proteção diferencial susceptível a fenômenos especiais com destaque para aqueles que abordam sobre condições de transitórios eletromagnéticos.

4.1. Revisão bibliográfica

A modelagem dos elementos do SEP para avaliação do sistema de proteção diferencial susceptível a fenômenos especiais que promovem o aparecimento das correntes diferenciais indesejáveis preconizadas no capítulo 2 foi ancorada na apuração e na revisão bibliográfica de trabalhos correlatos. Nesta linha, apresentam-se as sínteses dos principais trabalhos consultados com relação ao modelo elétrico elaborado. Foram levantados parâmetros referentes aos modelos elétricos aplicados e características elétricas dos seguintes componentes: geradores do SEP, linha de transmissão (LT), transformadores de corrente, transformador de potência, linha de distribuição (LD) e carga do SEP.

Em [4] avalia-se a performance do sistema de proteção diferencial proposto em um SEP com fonte equivalente à 13,8 kV, transformador de potência de 25 MVA e relação de transformação de 138 kV para 13,8 kV em ligação triângulo-estrela aterrado, dois transformadores de corrente, relação de transformação sendo no primário de 200:5A e no secundário de 2000:5A, seguido de uma linha de distribuição com 5 km de extensão, conectando uma carga leve, média e pesada, com fator de potência 0,92 indutivo. O sistema elétrico proposto foi desenvolvido no *software* ATP. Nesse sistema destaca-se que o modelo do transformador aplicado corresponde ao modelo saturável. A partir dele, o TDP foi construído tendo seus enrolamentos divididos em porcentagens do total de modo que se pudesse avaliar o comportamento do sistema de proteção diferencial para diferentes situações de faltas internas, como por exemplo: situação de falta interna aplicada a 10%, 25% e 80% do enrolamento.

Em [61] o sistema elétrico foi desenvolvido usando módulos do *software* MATLAB-Simulink com as seguintes características: 50 Hz, 450 MVA, transformador de 500 MVA e carga de 100 MW conectada em paralelo. Foram simuladas nesse trabalho as seguintes condições de operação: normal, energização, faltas internas e externas.

Em [9] foram avaliados três tipos de TDP com características e configurações elétricas distintas a fim de testar o desempenho da metodologia proposta pelo trabalho perante diferentes transformadores e grupos de conexão. Utilizou-se a interface ATP para modelar o SEP e nota-se aplicação de gerador síncrono do bloco digital "SM59_NC" do ATP e a utilização dos modelos híbridos e saturáveis para modelagem do TDP. O modelo híbrido foi utilizado nas simulações de energização, falta interna em 100% do enrolamento, falta externa, sobre-excitação, energização solidária e rejeição de carga. Nas faltas internas nos enrolamentos do TDP foi utilizado modelo saturável assim como feito em [4] e [9].

Em [62] todas as simulações foram realizadas pelo *software* ATP e aplicando-se a linguagem MODELS[14], criou-se modelos de componentes do sistema elétrico que não existem de forma intrínseca ao ATP, como é o caso dos elementos do relé microprocessado modelado neste trabalho. .

Além das referências citadas, foram observados os modelos elétricos adotados nas referências [8], [32], [35] e demais trabalhos correlatos.

4.2. Componentes do sistema elétrico de potência

A implementação da metodologia para avaliação do desempenho do sistema de proteção diferencial aplicado em TDP perpassa pela construção de um modelo de sistema elétrico de potência que reproduza o mais próximo possível as condições reais de operação as quais o transformador e seus componentes são submetidos. Isto posto, é de grande importância que a construção matemática e a sua respectiva parametrização apresentem fundamentação consistente. Apresentam-se a seguir a descrição dos parâmetros e premissas assumidas referentes aos componentes do sistema modelado no *software* ATP, a saber:

- Gerador do sistema elétrico de potência;
- Linha de transmissão entre gerador e TDP;
- Transformadores de corrente;
- Transformador de potência;
- Rede de distribuição entre o TDP e centro de carga;
- Carga do sistema elétrico de potência.

[14] MODELS é uma linguagem de programação estruturada anexa ao ATP voltada para a simulação no domínio do tempo.

4.2.1. Gerador

Os geradores constituem-se equipamentos essenciais para sistemas elétricos de potência, pois são responsáveis pelo fornecimento de energia elétrica e pela manutenção da potência disponibilizada para vários centros de carga [50]. Neste trabalho, não foram consideradas flutuações de tensão e de frequência do gerador do SEP. Dessa forma, a tensão e a frequência permaneceram fixas em todas as simulações, com exceção apenas da simulação em que o objetivo corresponde avaliar o aparecimento de correntes de magnetização provocadas pela sobre-excitação do transformador. Nessa situação de excitação anormal do núcleo do TDP, aplicou-se ao modelo fonte de tensão complementar com as mesmas características da fonte primária para fornecimento de energia elétrica, porém com valor nominal superior em 50%.

Os dados e parâmetros do gerador são apresentados na Tabela 4.1.Esses dados foram determinados empiricamente tendo como princípio modelos de gerador aplicados na literatura.

Tabela 4.1 – Parâmetros do Gerador

Parâmetro	Valor
Tensão	230 kV
Frequência	60 Hz
Ro	0,2690 Ω
Lo	6,2320 mH
R+	0,2072 Ω
L+	1,4551 mH
Sinal	Senoidal

No *software* ATP, o gerador foi simulado a partir de fonte trifásica senoidal (AC3PH) e linha de transmissão trifásica acoplada e simétrica com impedância de sequência zero e positiva (LINESY_3). A Figura 4.1 apresenta os símbolos dos modelos aplicados no *software* ATP.

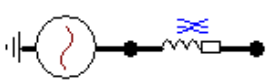


Figura 4.1 – Símbolos dos modelos aplicados para simulação do gerador do SEP

4.2.2. Linha de Transmissão entre gerador e transformador de Potência

A linha de transmissão do SEP corresponde a uma linha média[15] com comprimento de 100 km que conecta o transformador de potência à fonte geradora com tensão de 230 kV, modelado a partir de parâmetros distribuídos variáveis com a frequência, o JMARTI [63].

No *software* ATP o modelo JMARTI está disponível pela caixa de diálogo da rotina LCC (*Line Cable Constants*). Apresentam-se a seguir os parâmetros para modelagem da linha de transmissão do lado de alta tensão do transformador de potência a partir do modelo JMARTI configurado pela rotina LCC do ATP:

- Tipo de Sistema: Linha de Transmissão Aérea;
- N° de condutores: 5, sendo 3 condutores de fase e 2 condutores para-raios
- Resistividade do solo: 200 Ωm
- Comprimento da LT: 100 km
- Linha transposta;
- Efeito pelicular considerado;
- Parâmetros dos Condutores de Fase:
    - Raio interno do condutor (R_{in}): 6,73 *mm;*
    - Diâmetro externo do condutor (R_{out}): 18,29 *mm;*
    - Resistência em corrente contínua a 50ºC (R_{DC}): $0{,}1736\ \Omega/km$;
    - Flecha: 5,50 m;
- Parâmetros dos Condutores para-raios:
    - Diâmetro externo do condutor (R_{out}): 8,7 *mm;*
    - Resistência em corrente contínua a 50ºC (R_{DC}): 1,844 Ω/km;
    - Flecha: 4,4 m;

As disposições geométricas dos condutores de fase e para-raios nas torres de transmissão são representadas pela Figura 4.2 e seus valores apresentados pela Tabela 4.2.

[15] Linha de transmissão com comprimento entre 80 e 240 km [82]

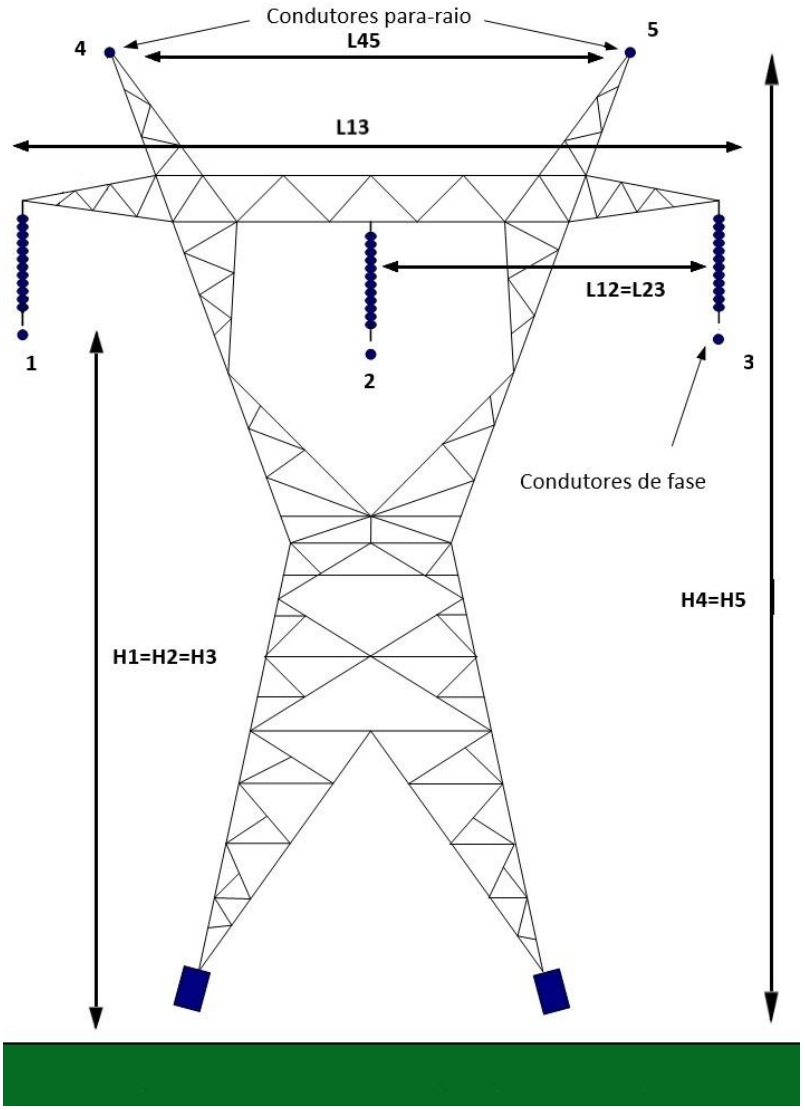


Figura 4.2 – Disposições geométricas dos condutores nas torres de transmissão (Adaptado de [64])

Tabela 4.2 – Valores dos parâmetros geométricos da torre de transmissão

Parâmetros	**Valor**
$\boldsymbol{H_1 = H_2 = H_3}$	12,5 m
$\boldsymbol{L_{12} = L_{23}}$	7,5 m
$\boldsymbol{L_{13}}$	15,0 m
$\boldsymbol{L_{45}}$	9,0 m
$\boldsymbol{H_4 = H_5}$	22,2 m

As Figuras 4.3, 4.4 e 4.5, apresentam os símbolos e as janelas de parametrização dos modelos aplicados no *software* ATP.

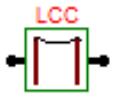


Figura 4.3 – Símbolo do modelo LCC (*Line Cable Constants*) do *software* ATP

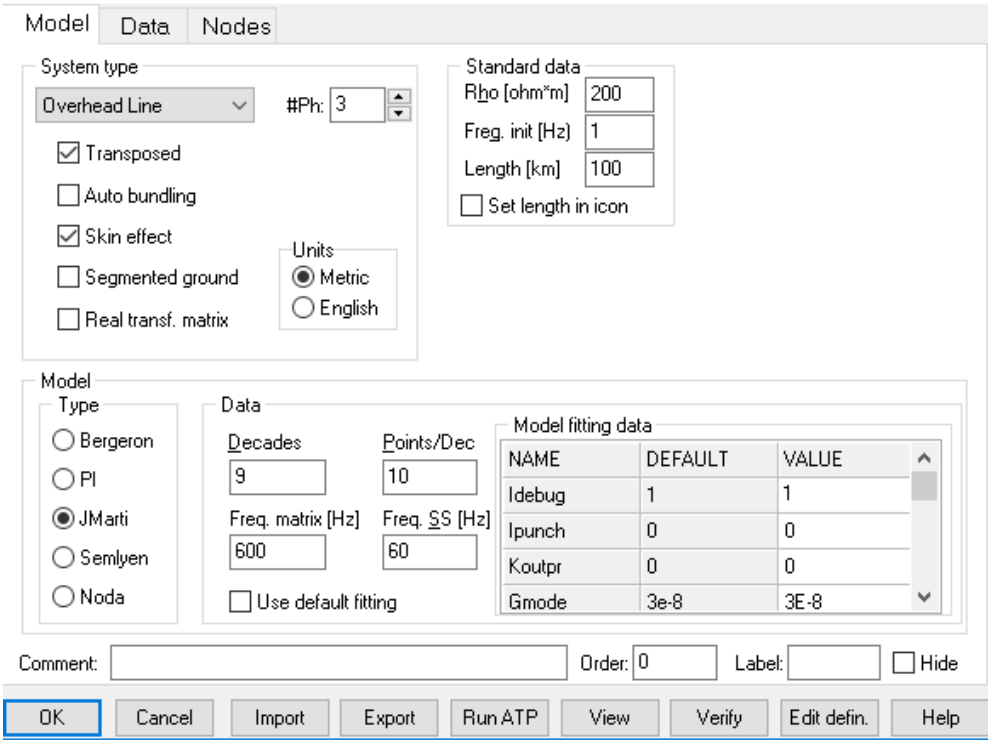


Figura 4.4 – Janela de parametrização do modelo JMARTI

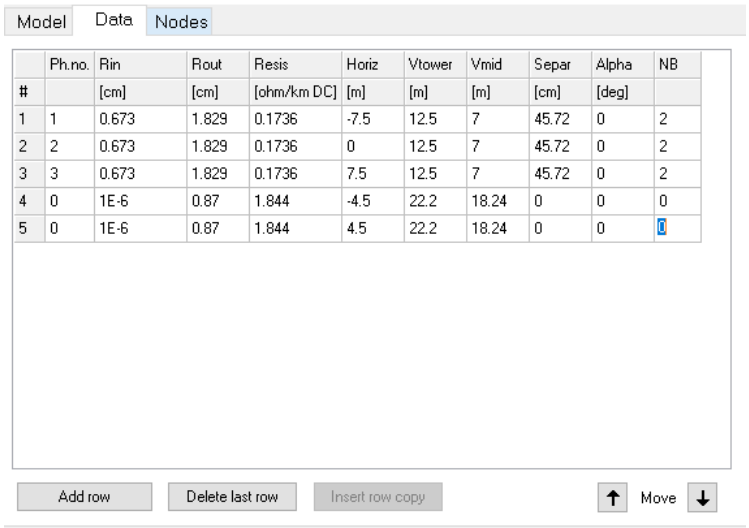


Figura 4.5 – Janela de parametrização dos dados geométricos da linha de transmissão modelado a partir de JMARTI.

4.2.3. Transformadores de Corrente

Os TCs são equipamentos que permitem aos instrumentos de medição e proteção funcionarem adequadamente sem que seja necessário possuírem correntes nominais de acordo com a corrente de carga do circuito ao qual estão ligados [65]. Os TCs garantem maior nível de segurança e confiabilidade ao estabelecer isolação galvânica entre o sistema elétrico de potência e o sistema de medição e proteção.

Foram utilizados TCs nos enrolamentos primário e secundário conectados eletricamente de maneira invertida às conexões do TDP a fim de corrigir a defasagem angular [66]. Nesse sentido, para o enrolamento primário do transformador de potência conectado em triângulo, os TCs foram conectados em estrela, enquanto no enrolamento secundário do transformador de potência conectado em estrela, os TCs foram conectados em triângulo. Os TCs conectados no enrolamento primário, de alta tensão, foram dimensionados com relação de transformação 200:5 enquanto os TCs conectados no enrolamento secundário, de baixa tensão, com relação de transformação de 1000:5. Foi considerado na parametrização dos transformadores de corrente o efeito de saturação dos TCs, aplicando a curva de excitação da relação de transformação correspondente, a partir da rotina *saturation*, interna ao ATP, para a obtenção da curva fluxo – corrente. Na Figura 4.6 apresentam-se as curvas características de relações de transformação de 100:5 até 1200:5.

Utilizou-se do modelo transformador saturável (*Saturable Transformer)* disponível no ATP para parametrização dos TCs e inserção da curva fluxo-corrente necessária para considerar o efeito de saturação do TC.

A modelagem do TC é desenvolvida com base na relação de espiras, resistência ôhmica por espira, relação de tensão de excitação por espira e a curva de excitação. Apresentam-se na Tabela 4.3 os parâmetros aplicados ao transformador saturável do ATP para os TCs conectados nos enrolamentos primário e secundário do transformador de potência a partir da referência [67]. A curva de excitação é apresentada na Figura 4.6.

Tabela 4.3 – Parâmetros aplicados nos TCs

Parametrização dos Transformadores de Corrente	**Conexão**	
	Enrolamento 1º do Trafo	Enrolamento 2º do Trafo
Classe do Transformador de Corrente	*C800*	
Relação de Espiras (*Vrp/Vrs*)	*40:1*	*200:1*
Resistência Ôhmica por espira	$0{,}0024\ \Omega/espira$	
Tensão de Joelho	120 V	695
Resistência de Magnetização	$0\ \Omega$	
Indutância de Dispersão no enrolamento primário do TC	$0\ \Omega$	
Indutância de Dispersão no enrolamento secundário do TC	$1E^{-7}$	
Resistência de Dispersão no enrolamento primário do TC	*0,096*	*0,48*
Resistência de Dispersão no enrolamento secundário do TC	*0*	

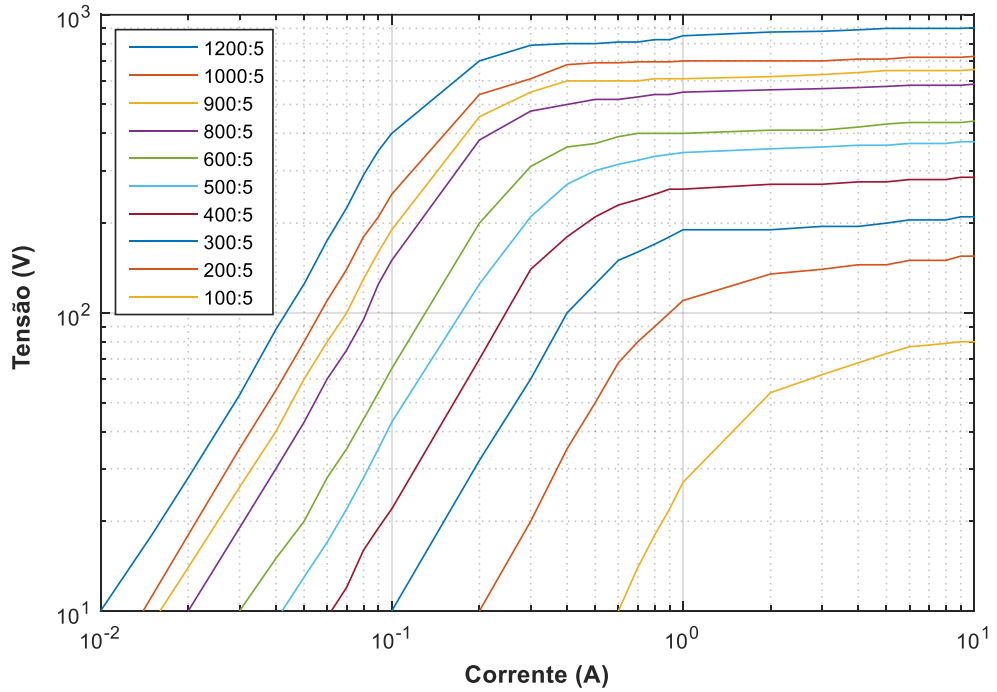


Figura 4.6 - Curva característica do TC (Adaptado de [67])

As Figuras 4.7 a 4.10 apresentam as janelas de parametrização dos TCs aplicados no *software* ATP respectivamente para o TC conectado no enrolamento primário do TDP e TC conectado no enrolamento secundário do TDP. A Figura 4.11 apresenta a simbologia do transformador saturável utilizado.

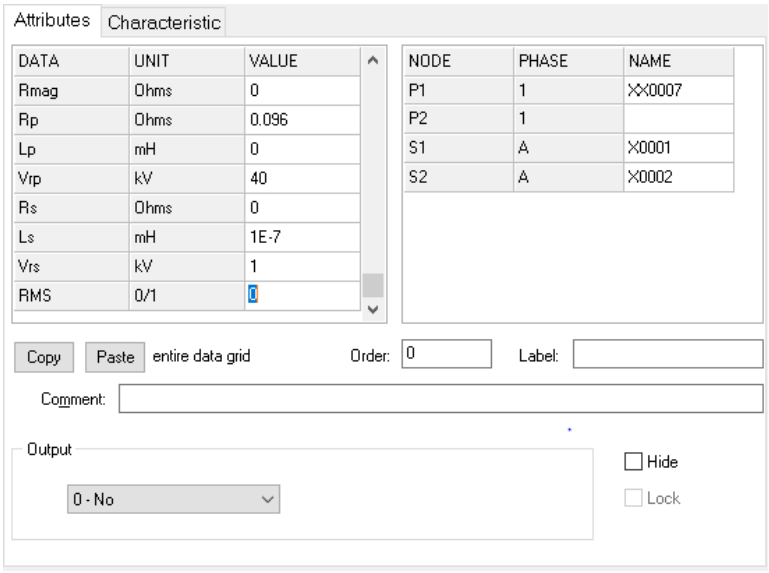


Figura 4.7 – Janelas de parametrização do TC no enrolamento primário do TDP a partir do transformador saturável (Atributos)

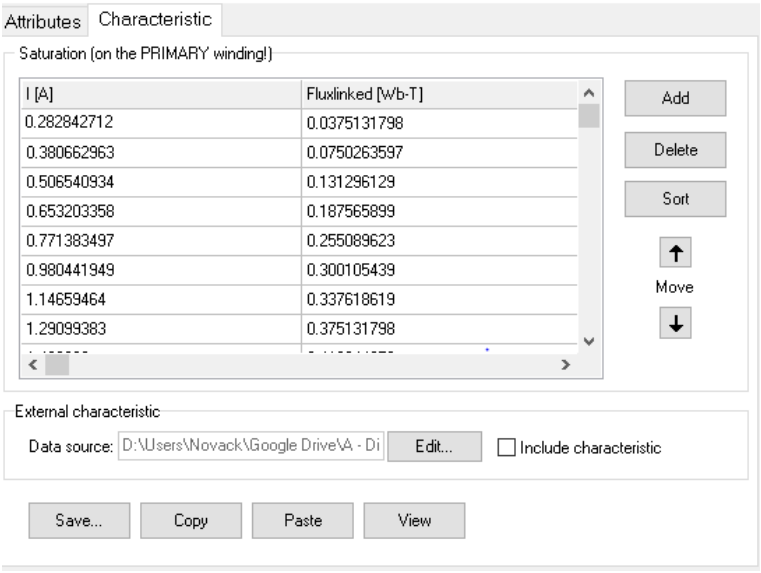


Figura 4.8 - Janelas de parametrização do TC no enrolamento primário do TDP a partir do transformador saturável (característica da curva de saturação)

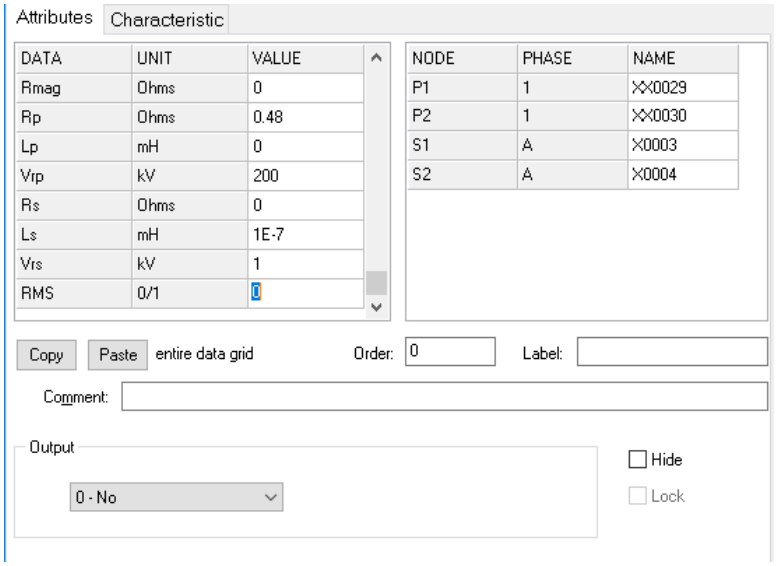


Figura 4.9 - Janelas de parametrização do TC no enrolamento secundário do TDP a partir do transformador saturável (Atributos)

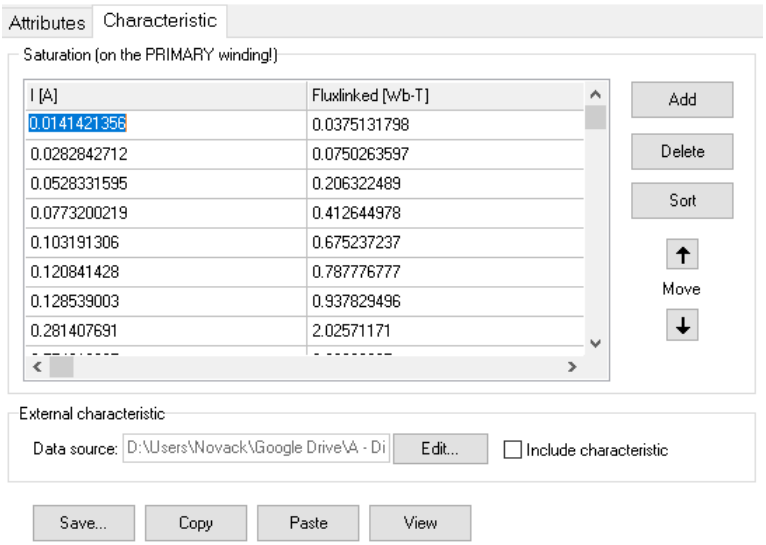


Figura 4.10 - Janelas de parametrização do TC no enrolamento secundário do TDP a partir do transformador saturável (característica da curva de saturação)



Figura 4.11 – Simbologia do transformador saturável

4.2.4. Transformador de Potência

A modelagem dos transformadores de potência apresenta complexidades, principalmente quando se deseja considerar as não-linearidades introduzidas pelo núcleo ferromagnético para avaliação dos efeitos dos transitórios eletromagnéticos na proteção diferencial. Dado que nem todas as características do transformador desempenham um papel relevante em todos os transitórios eletromagnéticos os quais o SEP está submetido, é comum fazer uso de diretrizes de modelagem, recomendadas para transformadores e apresentadas na Tabela 4.4 [63]. Na Tabela 4.5 apresentam-se os fenômenos transitórios que podem ocorrem no SEP, identificando a faixa de frequência nas quais os sinais transitórios se apresentam [64].

Tabela 4.4 – Guia de modelagem para transformador de potência por faixa de frequência (Retirado de [68])

Parâmetro/Efeito	Modo Geral
Oscilações de baixa frequência 0,1 Hz a 1 kHz	Os modelos devem incorporar efeitos de saturação, bem como as perdas do núcleo e do enrolamento. Modelos de núcleos monofásicos e trifásicos podemos mostrar diferenças significativas.
Surtos de frente lentas 50/60 Hz até 20 kHz	
Surtos de frente rápidas 3 kHz a 3 MHz	Perdas no núcleo e saturação podem ser ignoradas. O acoplamento entre fases é principalmente capacitivo. A influência da impedância de curto-circuito pode ser significativa.
Surtos de frente muito rápidas 100 kHz a 50 MHz	Perdas no núcleo e saturação podem ser ignoradas. O acoplamento entre fases é principalmente capacitivo. O modelo deve incorporar a impedância de surto do enrolamento.

Tabela 4.5 - Eventos transitórios em SEP e suas frequências associadas (Retirado de [69])

Evento Transitório	Faixa de Frequência
Energização de transformadores e ferro-ressonância	(DC) 0,1 Hz – 1 kHz
Rejeição de carga	0,1 kHz – 3 kHz
Remoção de faltas	50/60 Hz – 3 kHz
Falta inicial	50/60 Hz – 20 kHz
Energização de linhas	50/60 Hz – 20 kHz
Reenergização de linhas	(DC) 50/60 Hz – 20 kHz
Faltas em terminais	50/60 Hz – 20 kHz
Faltas de curta distância	50/60 Hz – 100 kHz
Fechamento múltiplo de disjuntor	10 kHz – 1 MHz
Surtos atmosféricos e faltas em subestações	10 kHz – 3 MHz
Faltas em GIS (*Gas Insulated Switchgear*)	100 kHz – 100 MHz

Segundo a Tabela 4.4, para os fenômenos de energização e ferro-ressonância, rejeição de carga, remoção de faltas, falta inicial e energização de linhas que geram sinais transitórios entre 0 e 20 kHz, a modelagem deve incorporar efeitos de saturação, bem como as perdas do núcleo e do enrolamento.

O *software* ATP fornece três modelos disponíveis para simulação da operação dos TDPs considerando os transitórios acima mencionados: transformador saturável (*Saturable Transformer Component*), BCTRAN e o modelo Híbrido. Cada um dos modelos apresenta vantagens e desvantagens relacionadas à simplicidade na parametrização, limitações operacionais, flexibilidade e fenômenos eletromagnéticos considerados em suas modelagens. Apresentam-se a seguir as descrições dos modelos disponíveis no *software* ATP.

- **Transformador Saturável:** O transformador saturável (*Saturable Transformer)* foi originalmente desenvolvido para transformadores monofásicos de N enrolamentos. Por meio dele é possível configurar as impedâncias de cada um dos N enrolamentos, as relações de transformação e a curva de saturação que estabelece a relação de tensão com a corrente de magnetização do núcleo do TDP. Na Figura 4.12 é representado o modelo em estrela para *o Saturable Transformer Component* (STC) monofásico com N enrolamentos. O modelo apresentado pela Figura 4.12 tem vantagem de ser facilmente estendido a unidades trifásicas e parametrizado a partir dos resultados dos ensaios de curto-circuito e a vazio. Além dessas vantagens, destaca-se ainda a flexibilidade em ramificar os enrolamentos primários e secundários dos TDPs a fim de simular condições

de faltas internas em seus núcleos [4]. Para consideração dos transitórios eletromagnéticos é preciso levantar e adicionar a curva de saturação e de histerese do transformador de potência ao modelo STC. A adição da curva de saturação e de histerese é baseada na adição de um indutor não linear extra no ponto estrela do modelo de transformador de potência de *N* enrolamentos. A curva de saturação do trafo é normalmente disponibilizada pelo fabricante, porém, pode ser estimada. Em relação à curva de histerese, essa deve ser obtida considerando vários níveis de tensão em testes de excitação. Apesar da aplicabilidade do modelo para transformadores de potência no âmbito dos transitórios eletromagnéticos, o STC apresenta várias limitações quando deseja-se avaliar o comportamento do SEP frente aos transitórios eletromagnéticos. A seguir são listados algumas das limitações do modelo.

1. Não pode ser utilizado para mais do que três enrolamentos, pois o circuito estrela não é válido para *N*>3.
2. A indutância de magnetização linear ou não-linear, com R_m em paralelo, é conectada ao ponto estrela, o qual nem sempre é o melhor ponto de conexão.
3. Corresponde a um modelo de grande instabilidade numérica para o caso de três enrolamentos, por apresentar indutância negativa em seu modelo matemático [70] .
4. A extensão deste modelo para representação de transformadores trifásicos é feita através da adição do parâmetro relutância de sequência zero. Entretanto, seu uso para unidades trifásicas é limitado [54]. Considera-se que para análise de unidades trifásicas, as unidades são melhor modeladas com matrizes indutância e indutância inversa obtidas através do Modelo BCTRAN.

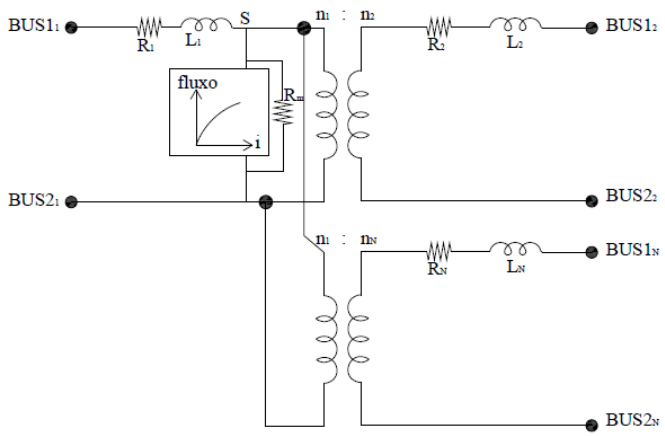


Figura 4.12 Representação do circuito estrela de transformadores de N- enrolamentos (Retirado de [71])

- **BCTRAN**: O modelo BCTRAN consiste em uma rotina de programação cujo resultado corresponde a obtenção das matrizes [L] - [R]. Essas matrizes são características de transformadores polifásicos, de dois ou mais enrolamentos, com núcleo do tipo envolvente ou envolvido, obtidas a partir dos dados dos testes de curto-circuito e a vazio. As perdas por excitação podem ser levadas em conta neste modelo, embora essas possam ser desprezadas para transformadores monofásicos e trifásicos de baixa relutância ou de elevada potência [72]. As matrizes representam o comportamento linear do transformador com razoável precisão quando submetidos a sinais que possuem desde a frequência fundamental até aproximadamente 2 kHz [73]. A saturação e histerese podem ser modeladas externamente com ramos adicionais [72]. A inclusão do ramo de magnetização é feita externamente por meio de elementos não lineares conectados a um dos terminais do transformador, o que nem sempre é topologicamente correto.
- **Modelo Híbrido:** O Modelo Híbrido permite a avaliação de transitórios de baixa e média frequências. A diferença principal entre esse modelo e os citados anteriormente é que ele leva em consideração a topologia do núcleo e os efeitos de saturação internamente ao seu modelo, pois são baseados no princípio da dualidade[16]. Neste caso, são incluídos os efeitos da saturação para cada coluna individual do núcleo, efeitos de dispersão e acoplamento magnético. Estes modelos são baseados no desenvolvimento de um circuito magnético de parâmetros concentrados, o qual representa o caminho do fluxo no núcleo e nos enrolamentos sendo posteriormente convertido em um circuito elétrico equivalente utilizando o princípio da dualidade [74]. O modelo híbrido destaca-se por considerar as características geométricas do transformador, como, por exemplo, altura de colunas, comprimento de jugos, seção transversal dos fios que constituem os enrolamentos, número de espiras, altura de enrolamentos, além do tipo de material de que é constituído o núcleo, o que contribui para melhorar os resultados das simulações dos transitórios em transformadores trifásicos. Entretanto, ao mesmo tempo, essas informações constituem a principal limitação do modelo em virtude de muitas vezes não serem fornecidas pelos fabricantes, especialmente para fins de estudos acadêmicos, o que torna difícil sua implementação quando se compara com os outros dois modelos, BCTRAN e STC.

[16] Modelos derivados da dualidade consistem em modelos cujo equivalente elétrico é utilizado para descrever o comportamento do núcleo magnético.

Dentre os modelos avaliados, o modelo híbrido apresenta-se como o mais completo para avaliação de transitórios de baixa e média frequência, porém apresenta limitação em dispor de informações insuficientes para parametrização do núcleo de transformadores de alta potência.

O modelo deste trabalho propõe a utilização do BCTRAN por se destacar frente ao modelo saturável na avaliação de fenômenos de baixa frequência em transformadores trifásicos.

Para a simulação da proteção diferencial do transformador de potência a partir da lógica proposta por meio da transformada *Wavelet* sob condições especiais, utilizaram-se TDPs trifásicos com conexão delta-estrela aterrado, potência de 100 MVA, relação de transformação de 230 kV para 34,5 kV e frequência operacional de 60 Hz. A seguir, apresentam-se os parâmetros para configuração do modelo do TDP.

Os parâmetros necessários para modelagem do TDP a partir do modelo BCTRAN são obtidos através dos ensaios a vazio e de curto-circuito do transformador. As Tabelas 4.6 e 4.7 apresentam os parâmetros determinados através dos ensaios a vazio e de curto-circuito [75].

Tabela 4.6 - Parâmetros do transformador trifásico determinados a partir do ensaio de curto-circuito (Retirado de [75])

Parâmetro	Símbolo	Valor
Impedância de Sequência Positiva	Z_1	12,50%
Potência de Curto-Circuito de Sequência Positiva	$P_{1,cc}$	358 kW
Corrente de Curto – Sequência Positiva	I_1	251 A
Impedância de Sequência Zero	Z_o	11,69 %
Potência de Sequência Zero	P_o	32,5 W
Tensão de Sequência Zero	V_o	364,89V
Corrente de Sequência Zero	$3I_o$	17,7 A

Tabela 4.7 – Parâmetros do transformador trifásico determinados a partir do ensaio a vazio (Retirado de [75])

Tensão – V	Corrente de Excitação - I_e[17]	Potência de Excitação - P_e
$V_{100\%}$	0,120 %	73.964 W
$V_{105\%}$	0,277 %	87.090 W
$V_{110\%}$	0,789 %	105.822 W
$V_{115\%}$	3,746 %	132.388 W

Na janela de ajustes do BCTRAN configurou-se o transformador para as características de ligação e parâmetros nominais provenientes dos ensaios a vazio e de curto-circuito mostrados nas Tabelas 4.6 e 4.7. Apresentam-se a seguir nas Figuras 4.13 a 4.15 as janelas de parametrização do BCTRAN e o símbolo do modelo no ATP.



Figura 4.13 - Símbolo do modelo BCTRAN no *software* ATP

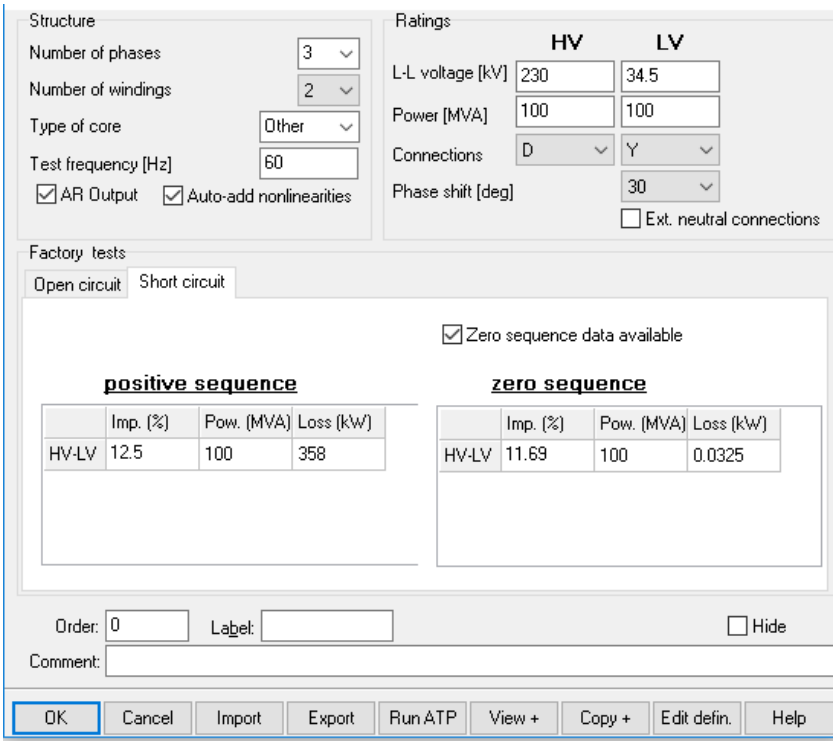


Figura 4.14 – Entrada de parâmetros obtidos a partir do ensaio de curto-circuito para o transformador trifásico

[17] Corrente de excitação em valores percentuais da corrente nominal

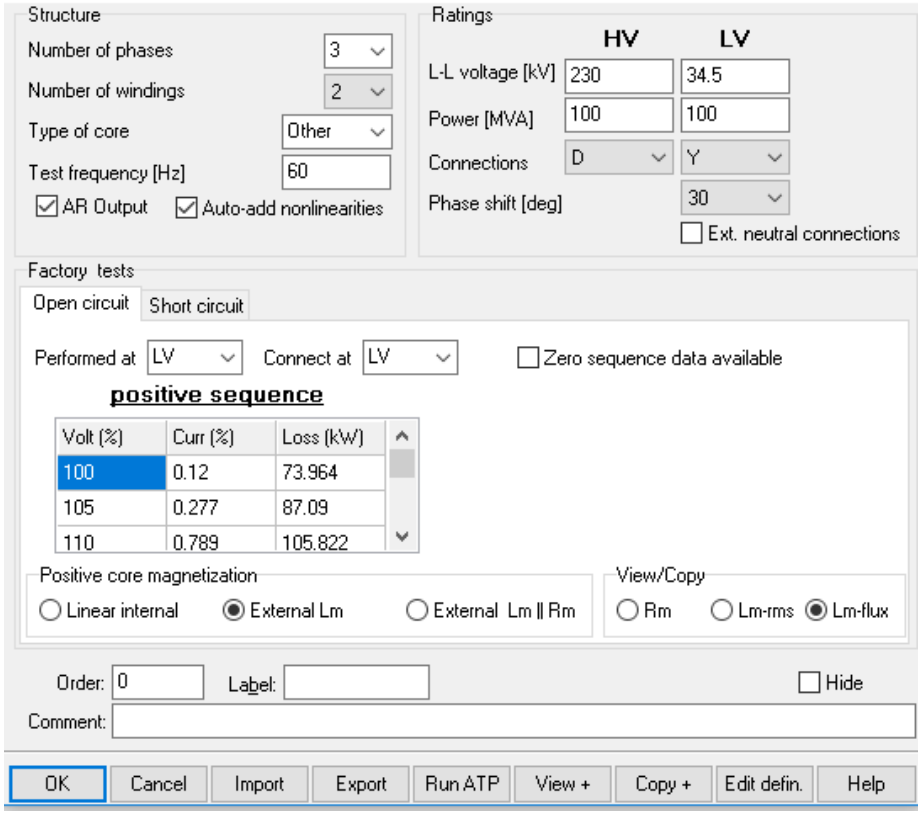


Figura 4.15 - Entrada de parâmetros obtidos a partir do ensaio a vazio para o transformador trifásico

Deve-se ressaltar que para avaliação dos fenômenos transitórios pelo modelo BCTRAN adicionou-se um ramo de magnetização externamente ao modelo por meio da seleção do item *Auto-add nonlinearities* em sua janela de parametrização.

4.2.5. Rede de Distribuição entre TDP e centro de carga

A rede de distribuição de 34,5 kV entre o TDP e o centro de carga foi modelada no SEP considerando-se parâmetros concentrados a partir da linha trifásica acoplada e simétrica com impedância de sequência zero e positiva (LINESY_3) do *software* ATP. Os parâmetros da rede de distribuição são apresentados na Tabela 4.8. Esses foram determinados empiricamente a partir de simulações e em modelos aplicados na literatura.

Tabela 4.8 – Parâmetros da linha de transmissão entre TDP e centro de carga

Parâmetro	Valor
Ro	9,7394 Ω
Lo	14,9193 mH
R+	6,6898 Ω
L+	8.6464 mH

A janela de parametrização da referida linha é mostrada pela Figura 4.16.

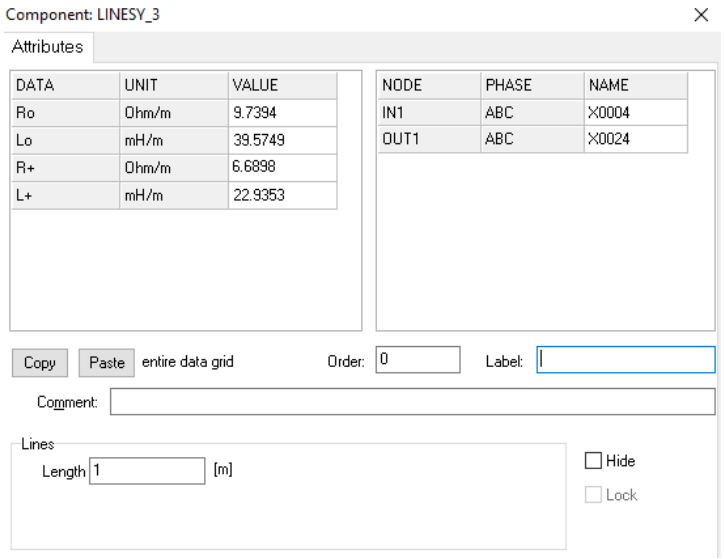


Figura 4.16 – Janela de parametrização da rede de distribuição entre TDP e centro de carga

4.2.6. Carga do sistema elétrico de potência

A carga conectada ao final da rede de distribuição de 13,8 kV foi projetada para todos os casos simulados uma carga média de 50 MVA com frequência fixa, ou seja, sem flutuações de carga e com fator de potência em 0,92 através do modelo " RLC Y 3" disponível no *ATP*. A Tabela 4.9 resume os valores de resistência e indutância para a carga modelada.

Tabela 4.9 Dados de carga ligadas ao fim da linha de transmissão

Carga	Potência	Z	R1	L1	$cos\,(\theta)$
Unidades	(MVA)	(Ω)	(Ω)	(mH)	Ind
Média	50	23,8050	21,9006	24,7476	0,92

A janela de parametrização da carga elétrica do SEP é apresentada na Figura 4.18 e seu símbolo no ATP na Figura 4.17.



Figura 4.17 - Símbolo da carga elétrica modelada do SEP no ATP

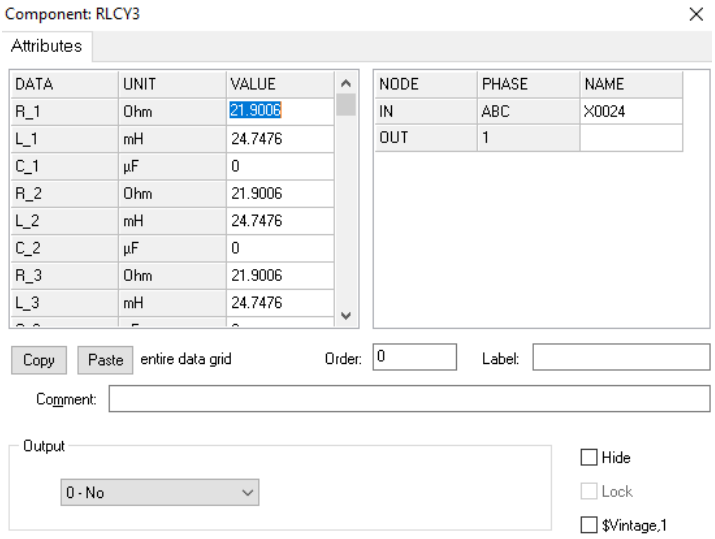


Figura 4.18 – Parametrização da carga elétrica projetada no ATP

4.3. Sistema elétrico de potência modelado

A Figura 4.19 apresenta a modelagem do SEP, com a identificação dos componentes elétricos detalhados na seção 4.2.

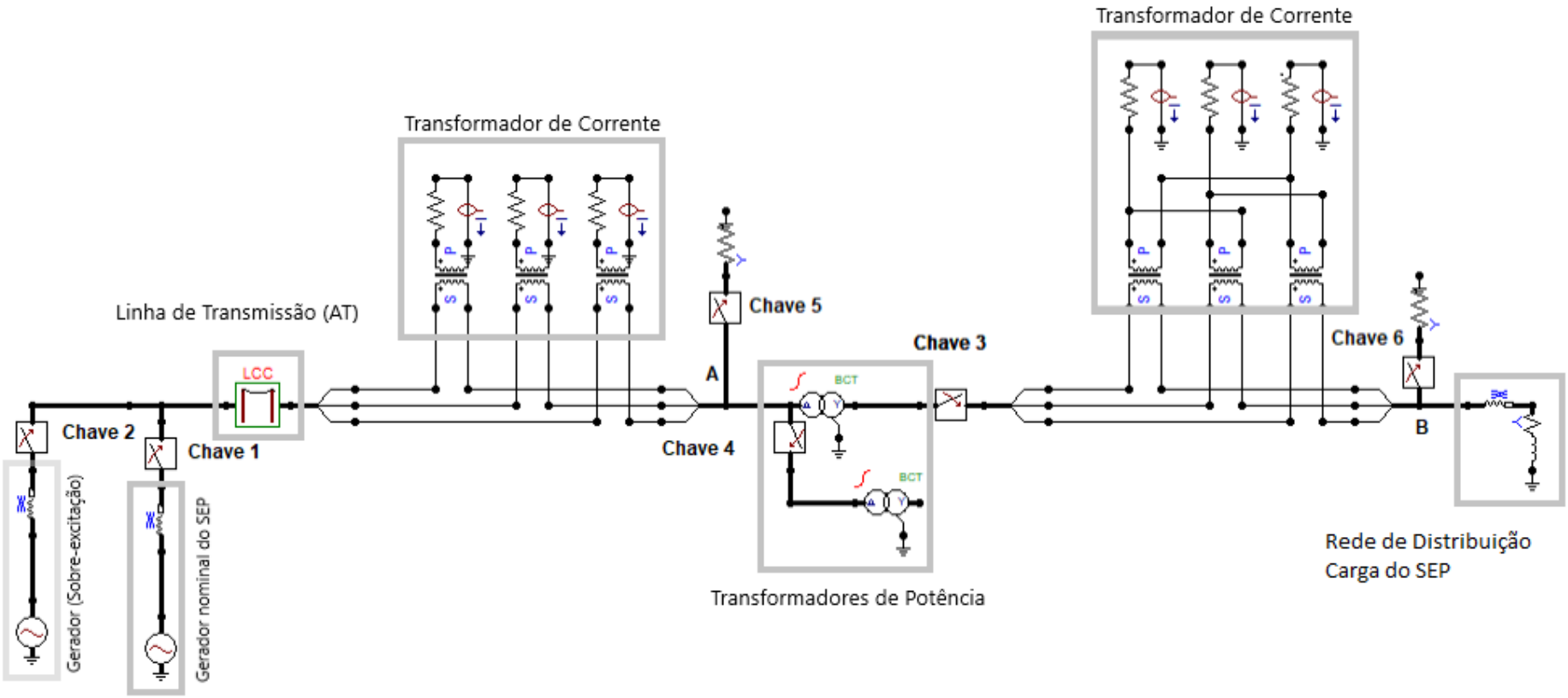


Figura 4.19 - Sistema elétrico modelado no *software* ATP

O sistema elétrico apresenta dois geradores elétricos, sendo um dedicado à simulação das condições normais de fornecimento de energia elétrica e outro destinado á simulação da condição de sobre-excitação cujo valor de tensão pode superar 150% do valor nominal. A utilização das fontes é condicionada pelo controle de acionamento das chaves 1 e 2, sendo:

- chave 1 fechada e chave 2 aberta – condição de normal de operação;
- chave 1 aberta e chave 2 fechada – condição de sobre-excitação do núcleo do TDP.

As demais chaves presentes na Figura 4.19 (chaves 3, 4, 5 e 6) são operadas durante o estudo para a simulação de faltas internas (chave 5), faltas externas (chave 6), energização solidária (chave 4) e condições de energização do transformador principal (chave 3).

Aclara-se que as ligações entre os TCs e o transformador de potência foram executadas para compensar o respectivo defasamento que ocorre devido à ligação delta-estrela do transformador de potência. Essa compensação foi observada quando da parametrização do relé digital.

4.4. Simulações realizadas

O modelo do SEP desenvolvido no *software* ATP preconizado na seção anterior foi submetido a diversas situações operacionais como energização, energização solidária, faltas (internas e externas), condição de sobre-excitação e de saturação dos TCs juntos ao transformador de potência. O conjunto de simulações será base para avaliação da metodologia proposta para aprimoramento da proteção diferencial percentual a partir da transformada *Wavelet.*

Foram realizadas simulações contemplando as seguintes situações:

- Energização do TDP a vazio;
- Energização do TDP com carga média;
- Energização solidária de um TDP conectado em paralelo com outro em funcionamento;
- Faltas externas monofásicas, bifásicas e trifásicas (AT, BT, CT, AB, BC, AC, ABT, BCT, ACT, ABCT)

- Falta interna monofásicas, bifásicas e trifásicas (AT, BT, CT, AB, BC, AC, ABT, BCT, ACT, ABCT)
- Sobre-excitação do TDP;
- Saturação dos TCs oriunda de faltas externas monofásicas, bifásicas e trifásicas.

Os fenômenos acima listados foram submetidos a diferentes configurações de sistema relativas à variação de ângulo de incidência do gerador do SEP, resistência de falta, tensão de fornecimento para casos de sobre-excitação e nível de saturação nos transformadores de corrente. A Tabela 4.10 apresenta as variações das configurações para cada fenômeno e o respectivo número de casos simulados.

Tabela 4.10 - Casos simulados a partir do SEP modelado no *software* ATP

Fenômeno	**Fases envolvidas**	**Tensão da Rede (% do Valor Nominal)**	**Ângulos de Incidência**	**Nível de Saturação do TC**	**No Casos Simulados**
Saturação de TC	A, B, C, AB e ABC	100%	0	baixa, média e alta	22
Energização de TDP	ABC	100%	0º a 90º com passo de 5º	NA	19
Energização de TDP com carga	ABC	100%	0º a 90º com passo de 5º	NA	19
Energização solidária	ABC	100%	0º a 90º com passo de 5º	NA	19
Falta Externa	AT, BT, CT, AB, BC, AC, ABT, BCT, ACT, ABCT	100%	0º a 90º com passo de 5º	NA	300
Falta Interna	AT, BT, CT, AB, BC, AC, ABT, BCT, ACT, ABCT	100%	0º a 90º com passo de 5º	NA	300
Sobre-excitação	ABC	120% a 200% com passo de 20%	0º. 45º e 90º	NA	15
		Total de casos simulados			**694**

4.4.1. Energização do Transformador de Potência

O fenômeno de energização de um TDP a vazio é simulado a partir da tensão nominal do SEP, 230 kV, com as chaves 2, 3, 4, 5 e 6 abertas e apenas a chave 1 fechada. Considerou-se na parametrização o fluxo residual nulo no momento da energização. A Figura 4.20 apresenta a corrente diferencial observada pelo relé diferencial percentual e na Figura 4.21, conforme era esperado, observam-se os harmônicos de 2ª e 3ª ordem dominantes durante o surgimento da energização.

A energização de um TDP com carga e a energização solidária apresentam o mesmo comportamento na análise de harmônicos e se distinguem pela configuração das chaves. Para energização com carga, a chave 3 é fechada e para energização solidária após o instante de $t = 0{,}05\ s$ outro transformador conectado em paralelo é energizado a partir do fechamento da chave 4.

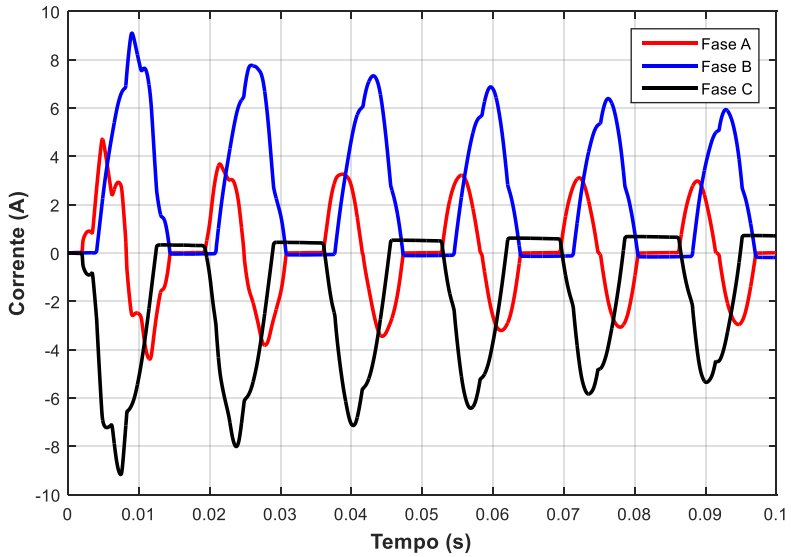


Figura 4.20 – Corrente diferencial durante a energização do TDP a vazio

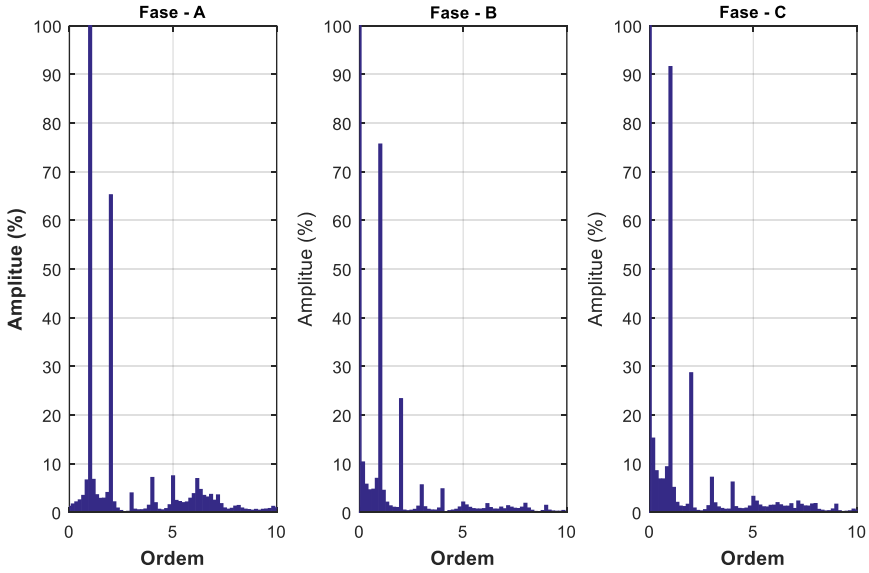


Figura 4.21 - Harmônicos da corrente diferencial durante a energização do TDP a vazio

4.4.2. Falta Externa

O fenômeno de falta externa é simulado ocorrendo sobre o ponto B indicado no sistema da Figura 4.19 no instante $t = 0{,}05\ s$, tendo as chaves 2, 4 e 5 abertas e as chaves 1, 3 e 6 fechadas. A Figura 4.22 apresenta as correntes obtidas pelos TCs conectados no enrolamentos primário e secundário do TDP para uma falta externa bifásica AB. Observa-se a convergência entre os comportamentos das correntes do primário e do secundário, situação típica de uma condição normal de operação no contexto da filosofia de proteção diferencial percentual.

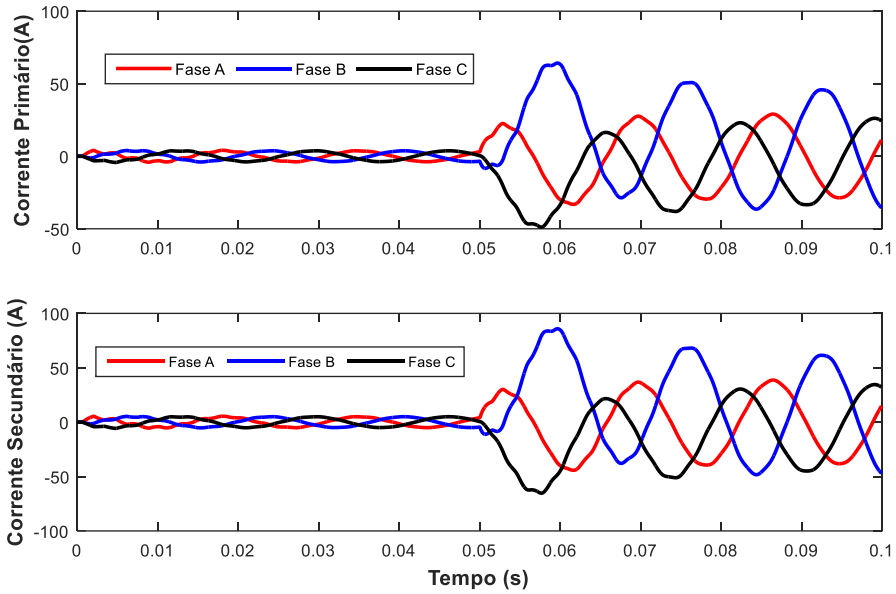


Figura 4.22 - Falta Bifásica AB aplicada no ponto B do sistema elétrico modelado

4.4.3. Falta Interna

O fenômeno de falta interna é simulado com ocorrência sobre o ponto A indicado no sistema da Figura 4.19 no instante $t = 0{,}05\ s$, tendo as chaves 2, 4 e 6 abertas e as chaves 1, 3 e 5 fechadas. A Figura 4.23 apresenta as correntes obtidas pelos TCs conectados nos enrolamentos primário e secundário do TDP para uma falta interna bifásica ABT. De forma oposta às faltas externas, é possível visualizar a divergência entre os comportamentos das correntes do primário e do secundário, o que configura para proteção diferencial percentual situação de atuação e envio do sinal de *trip* ao disjuntor associado.

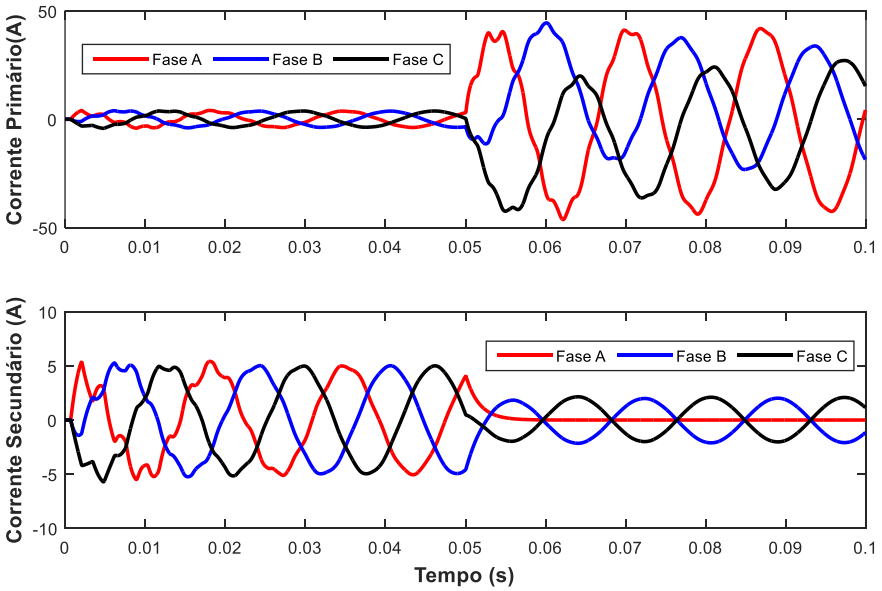


Figura 4.23 - Falta Bifásica Terra aplicada no ponto A do sistema elétrico modelado

4.4.4. Saturação de TC

O fenômeno de saturação dos TCs é simulado alterando-se a resistência de carga do enrolamento secundário do TC a fim de elevar a tensão de joelho e saturar o núcleo do TC. A saturação por sua vez é provocada por uma falta externa ao TDP ocorrendo no ponto B do sistema elétrico modelado no instante $t = 0{,}05\ s$. A configuração de chaves é estabelecida da seguinte forma: abertas 2, 4 e 5 e fechadas 1, 3 e 6. A Figura 4.24 apresenta a corrente diferencial distorcida devido à saturação do núcleo dos TCs.

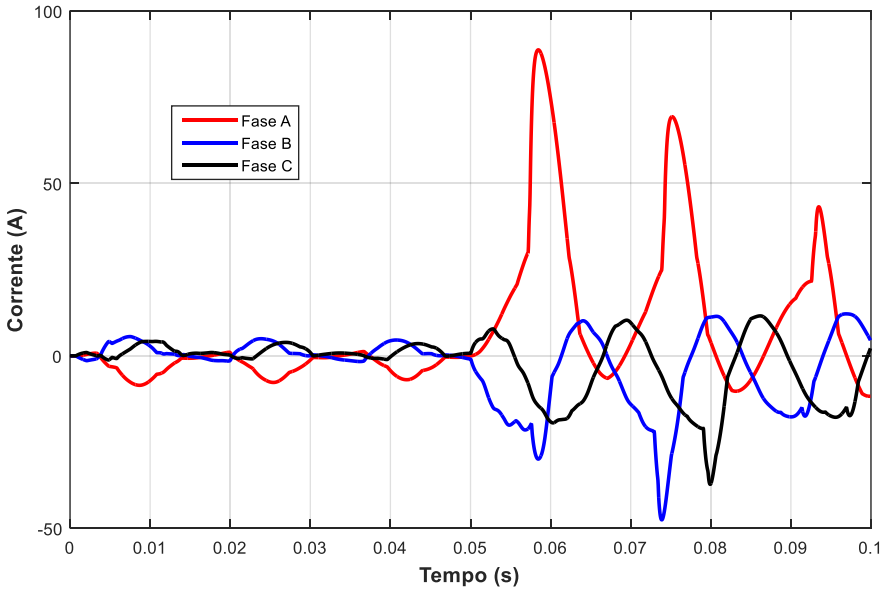


Figura 4.24 - Corrente diferencial após saturação de TC provocada por uma falta externa

4.4.5. Sobre-excitação

O fenômeno de sobre-excitação é simulado a partir de gerador adicional com tensão variando de 120% a 200% do valor nominal. Para essa simulação as chaves 1 e 2 são comutadas de estado no instante $t = 0{,}05\ s$, momento o qual a tensão migra de um valor nominal de 100% para um valor entre 120% e 200% do valor nominal. A Figura 4.25 apresenta a corrente diferencial durante a sobre-excitação do TDP após o instante *t* e os harmônicos de 2ª, 3ª e 5ª ordem característicos do evento são mostrados na Figura 4.26.

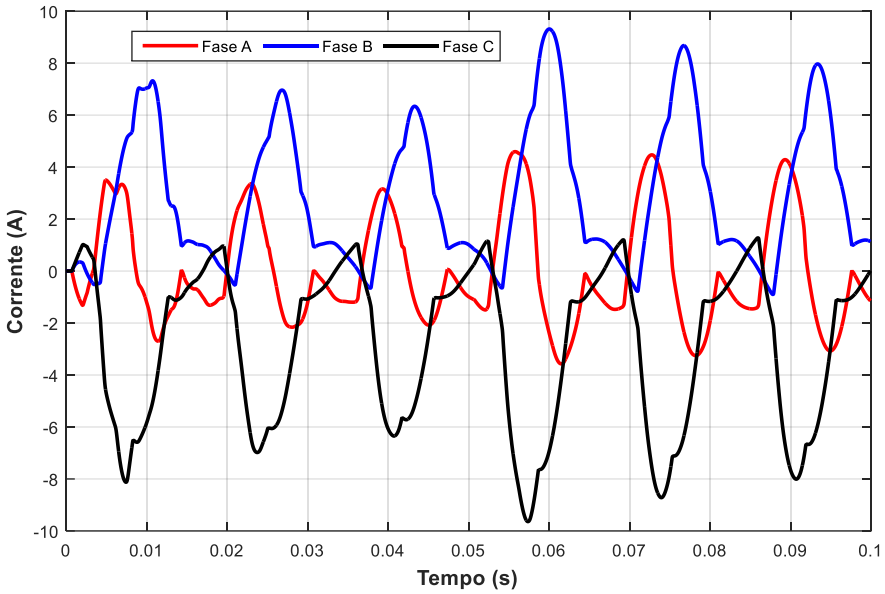


Figura 4.25 - Sobre-excitação do TDP modelado

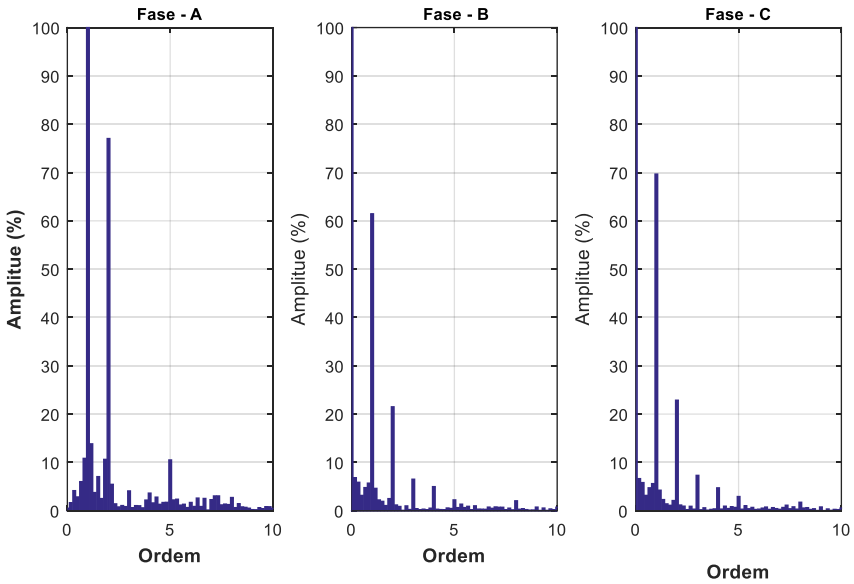


Figura 4.26 - Harmônicos característicos do evento de sobre-excitação do TDP modelado

4.5. Considerações finais

O presente capítulo teve como objetivo apresentar o modelo de cada componente do SEP utilizado no *software* ATP para as simulações. A partir de uma vasta consulta na literatura, foram selecionados modelos e componentes utilizados para estruturação do sistema elétrico que

possuíssem capacidade de representar os transitórios eletromagnéticos, aos quais o TDP é submetido.

A partir do SEP modelado apresentado na Figura 4.19, simularam-se as condições normais de operação, de falta interna e externa, e de condições especiais de operação como energização de TDP, energização solidária, sobre-excitação e saturação de TC. Adicionalmente à possibilidade de simular tais condições, foram geradas diversas simulações com diferentes configurações de conexão e de parâmetros elétricos tais como, resistência de falta interna e externa, ângulo de incidência, tensão de sobre-excitação e nível de saturação para cada fase dos TCs. No total foram simulados 694 casos, que correspondem à base para avaliar a eficácia da metodologia proposta deste trabalho a partir da transformada *Wavelet.*

Capítulo 5 - Metodologia de Proteção Diferencial e Resultados Obtidos

Este capítulo apresenta a metodologia do sistema de proteção diferencial para o transformador de potência a partir da TW avaliando sua eficácia e celeridade na detecção dos fenômenos elétricos simulados no SEP modelado.

5.1. Introdução

O presente capítulo avalia a metodologia ancorada na utilização da transformada *Wavelet* para análise de um sistema de proteção diferencial de um TDP submetido a condições de operação normal, faltas internas, faltas externas e demais condições especiais de operação como energização de TDP, sobre-excitação e saturação de TC.

Para avaliação da metodologia proposta, o sistema elétrico de potência foi modelado no *software* de simulação de transitórios eletromagnéticos ATP, conforme configuração de parâmetros apresentada no Capítulo 4, com frequência de amostragem (F_s) de 30 kHz. Foram realizadas 694 simulações com distintas condições operacionais como energização do TDP, energização solidária, faltas (internas e externas), sobre-excitação do TDP e de saturação dos TC. A partir dessas simulações, as correntes nos enrolamentos primário e secundário do TDP, amostradas a partir dos transformadores de corrente, foram submetidas ao algoritmo de proteção desenvolvido no *software* computacional MATLAB e os resultados são apresentados neste capítulo.

5.2. Algoritmo de proteção diferencial

O algoritmo de proteção elaborado objetiva, a partir da implementação da TW, discriminar faltas internas de externas ao transformador, bem como faltas internas de distúrbios não faltosos caracterizado por condições especiais de operação.

A lógica de programação foi estruturada em 3 sub-rotinas operacionais: Bloco 1 – Pré-Processamento de sinal, Bloco 2 – Detecção de distúrbio, Bloco 3 – Discriminação de eventos faltosos de não faltosos e Bloco 4 – Classificação dos distúrbios. A seguir são descritos os blocos operacionais do algoritmo de proteção avaliado neste trabalho.

O fluxograma do algoritmo de proteção é apresentado na Figura 5.1, onde se ilustra o esquema de decisão lógica da metodologia proposta. O funcionamento e a fundamentação teórica são detalhados a seguir.

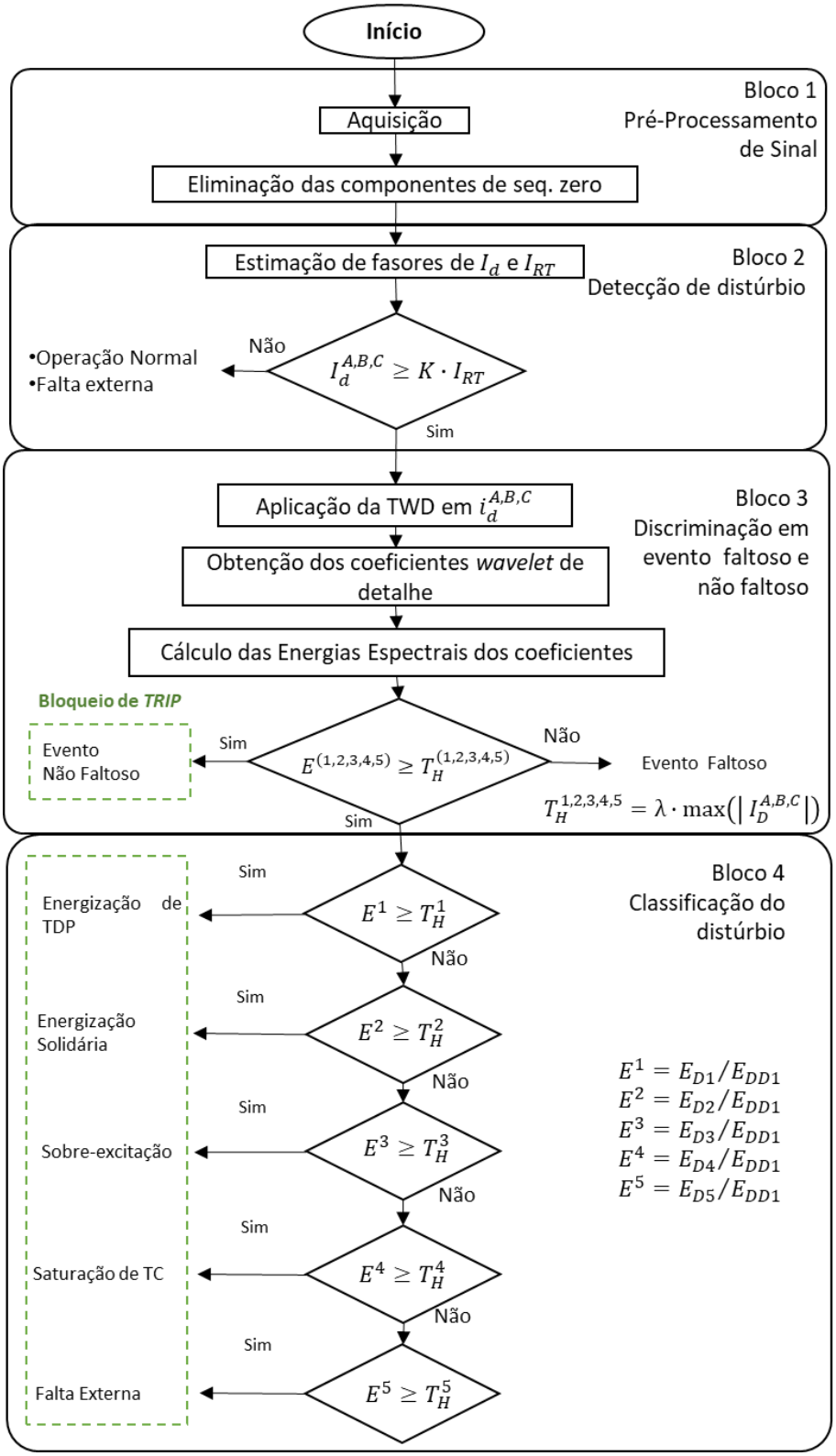


Figura 5.1 - Fluxograma geral da metodologia de proteção proposta

5.2.1. Bloco 1 – Pré-processamento de sinais

A etapa de pré-processamento de sinais é composta pela execução de duas etapas: aquisição de dados e eliminação da componente de sequência zero.

A etapa de aquisição de dados consiste em incorporar ao algoritmo de proteção desenvolvido as medições de corrente oriundas dos TCs em ambos enrolamentos do TDP. Para aquisição de sinais foi desenvolvida uma função matemática no *software* MATLAB, com objetivo de delimitar o intervalo de análise da amostra de sinais e importar os dados de corrente das simulações.

A eliminação da componente de sequência zero é aplicada apenas nos enrolamentos ligados em Y, devido a filtragem natural das componentes de sequência zero nos enrolamentos ligados em Δ. Dessa forma, a fim de evitar desequilíbrios indesejáveis na corrente diferencial, procede-se com a execução da eliminação da componente de sequência zero no lado do enrolamento em *Y.*

5.2.2. Bloco 2 - Detecção do Distúrbio

O primeiro passo consiste em avaliar as correntes dos TCs, relativas aos enrolamentos primário e secundário do TDP. Essa avaliação corresponde ao cálculo dos fasores a partir das correntes trifásicas diferenciais e das correntes de restrição, correlacionadas com um fator de regulação K para cada instante de amostragem. O bloco 2 objetiva detectar distúrbios que careçam de uma maior investigação, de forma que seja possível identificar o evento ao qual o transformador de potência está sendo submetido.

As correntes diferenciais trifásicas são calculadas, conforme já apresentado no Capítulo 2, por meio das equações expressas a seguir.

$$I_d^{A,B,C} = (\vec{\imath}_{1s} - \vec{\imath}_{2s})^{A,B,C} \qquad (5.1)$$

Onde:

$\vec{\imath}_{1s}$, $\vec{\imath}_{2s}$ correntes secundárias dos TCs para as fases A, B e C.

Quando qualquer uma das correntes diferenciais calculadas através da equação (5.1) ultrapassa um valor limiar pré-definido, iniciam-se os cálculos para a análise dessas correntes. O limiar de corrente é calculado a partir do produto entre o fator de regulação *K* e a corrente de restrição do relé diferencial convencional. O cálculo da corrente de limiar é realizado para cada uma das fases e a equação (5.2) a seguir apresenta a fórmula utilizada:

$$I_a^{A,B,C} = K \cdot I_{RT} = K \cdot \frac{(\vec{\imath}_{1s} + \vec{\imath}_{2s})^{A,B,C}}{2} \qquad (5.2)$$

Onde:

$I_a^{A,B,C}$ corrente de limiar de operação para as fases A, B e C

K característica diferencial percentual do transformador

I_{RT} corrente de restrição

$\vec{\imath}_{1s}$, $\vec{\imath}_{1s}$ correntes secundárias dos TCs para as fases A, B e C

A regulação da corrente de limiar é realizada através da variável K, conhecida como característica diferencial percentual. Esse fator de sensibilidade é utilizado para prevenir falsas operações do relé devido à saturação dos TCs ou mudanças bruscas de *tap* no TDP. Na literatura consultada, o valor de K assume os seguintes valores característicos: 10%, 20% e 40%. Um valor igual a 10% resulta em um relé diferencial com maior sensibilidade do que parametrizado com constante K de 40% [5]. Neste trabalho, emprega-se o valor de 40% com menor sensibilidade em decorrência do descasamento da relação de transformação do TDP e das relações dos TCs.

Quando a corrente diferencial de uma das fases do TDP, $I_d^{A,B,C}$, supera a corrente de limiar de operação, tem-se, portanto, a detecção de distúrbio, que pode corresponder a uma falta interna ou situações relacionadas ao aparecimento de fenômenos transitórios no TDP. Dessa forma, o algoritmo desenvolvido estabelece que identificada a situação de desequilíbrio entre as correntes primária e secundária, prossegue-se com a operação do bloco 3, onde se aplica a transformada *Wavelet* para correta discriminação do distúrbio. Se nenhuma dessas correntes trifásicas ultrapassar a corrente de limiar, o algoritmo não indica nenhuma ocorrência de distúrbio no TDP, não prosseguindo para execução do bloco 3. Neste caso, o evento avaliado corresponderá a uma falta externa ou operação normal do sistema.

A condição para detecção do bloco 2 é dada pela seguinte equação

$$\left|I_d^{A,B,C}\right| \geq \left|I_a^{A,B,C}\right| \geq |k \cdot I_{RT}| \quad (5.3)$$

5.2.3. Bloco 3 e 4 – Discriminação e classificação de eventos faltosos de não-faltosos

Quando a condição de detecção de distúrbio no TDP expressa pela equação (5.3) é atingida para qualquer uma das correntes trifásicas diferenciais, inicia-se o bloco 3 que tem como função a discriminação dos distúrbios entre eventos faltosos e não-faltosos. Nessa etapa as correntes diferenciais trifásicas são processadas a partir da TWD com 5 níveis de decomposição do sinal, a fim de avaliar o sinal sobre diferentes faixas de frequências. Com base no conteúdo espectral do sinal é possível associar o distúrbio a um evento faltoso ou não-faltoso, e se faltoso esse é discriminado no bloco 3 para posterior classificação. A decomposição do sinal ocorre a partir da implementação de filtros passa-baixa e passa-alta, configurados em estrutura piramidal conforme lógica operacional da AMR. Para cada decomposição obtêm-se os coeficientes de aproximação e detalhe associados às frequências desejadas. A Figura 5.2 apresenta a estrutura da AMR aplicada sobre as correntes diferenciais trifásicas. Nessa exibe-se a associação dos coeficientes *wavelet* para cada energia e faixa de frequências.

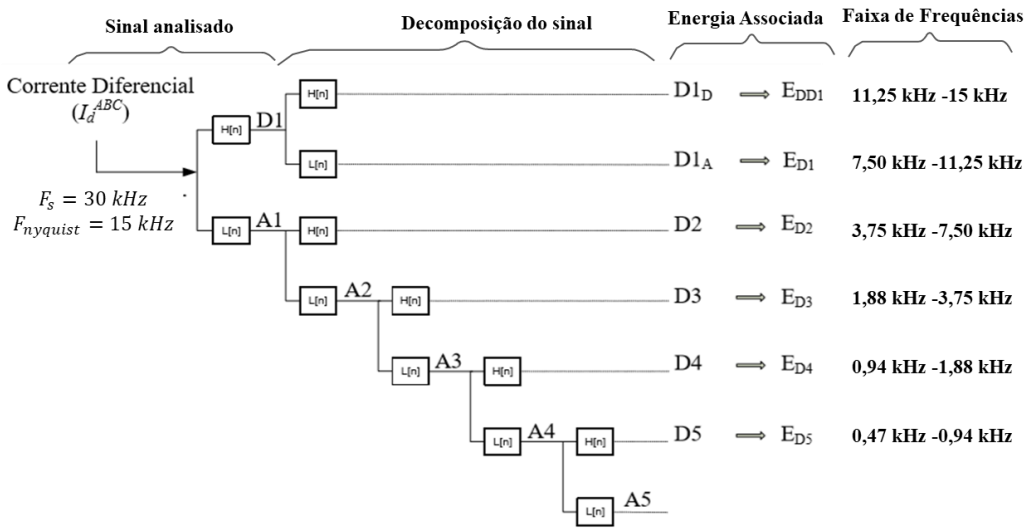


Figura 5.2 - Banco de filtros multi-estágio para AMR (adaptado de [3])

Após a decomposição em 6 faixas de frequências, sendo uma dessas faixas de frequências obtida pela decomposição do detalhe D1, o algoritmo desenvolvido calcula a energia espectral associada aos coeficientes *wavelets* de detalhe $D1_D, D1_A, D2, D3, D4$ e $D5$. A energia espectral é calculada segundo a equação (3.11) que consiste na somatória dos coeficientes de detalhe ao quadrado, considerando uma janela de processamento de sinais com tamanho de 32 amostras de sinal.

Na discriminação dos distúrbios bem como na classificação desses, considerou-se a relação entre as energias espectrais dos coeficientes de detalhe apresentada em [3] onde são calculadas as seguintes razões entre as energias:

$$E_1 = \frac{E_{D1}}{E_{DD_1}} \tag{5.4}$$

$$E_2 = \frac{E_{D2}}{E_{DD1}} \tag{5.5}$$

$$E_3 = \frac{E_{D3}}{E_{DD1}} \tag{5.6}$$

$$E_4 = \frac{E_{D4}}{E_{DD1}} \tag{5.7}$$

$$E_5 = \frac{E_{D5}}{E_{DD1}} \tag{5.8}$$

Sobre essas razões, destaca-se a decomposição do detalhe $D1$ em dois níveis de decomposição ($D1_D$ *e* $D1_A$), para utilizar uma faixa de mais altas frequências na detecção de faltas internas. Assim, a energia do detalhe D_{1D} (E_{DD1}) é utilizada para caracterizar faltas internas e a energia do detalhe D_{1A} (E_{D1}) utiliza-se para discriminar correntes de *inrush* [3].

Para discriminação e classificação das perturbações faltosas das não faltosas, foram utilizadas as razões expressas de (5.4) a (5.8) como referência para comparação com o limiar de operação, T_H, definido segundo a característica da corrente diferencial do evento avaliado. O limiar de operação foi parametrizado segundo a relação de dependência entre o valor máximo dentre as correntes diferenciais trifásicas e fatores de sensibilidade às variações das energias

dos coeficientes *wavelet.* O limiar de operação, T_H, é definido segundo a seguinte expressão (5.9):

$$T_H^{1,2,3,4,5} = \lambda \cdot \max\left(\left| I_D^{A,B,C} \right|\right) \tag{5.9}$$

Quando a relação entre o limiar de operação, T_H, e uma das razões das energias, $E_{1,2,3,4,5}$, expressa em (5.10) é atendida em pelo menos 15 amostras da janela de processamento de sinais definida em *13,33 ms,* o algoritmo de proteção indica a ocorrência de um dos eventos não-faltosos como energização de TDP, energização solidária, sobre-excitação, saturação de TC ou falta externa. A definição de uma janela de processamento de sinais para análise da relação entre o limiar de operação e a energia espectral dos coeficientes *wavelet* foi estabelecida em função do critério de variação da energia espectral em que para faltas internas, exceto para o instante de seu surgimento, a variação é nula enquanto que para condições caracterizadas pelo aparecimento de correntes de *inrush* a variação da energia espectral é não nula e ocorre ao longo de todo sinal.

$$E^{1,2,3,4,5} \geq T_H^{1,2,3,4,5} \tag{5.10}$$

Para cada uma das relações entre as razões das energias espectrais dos coeficientes *wavelet*, $E^{1,2,3,4,5}$, e os limiares de operação, $T_H^{1,2,3,4,5}$, são gerados indicadores de ocorrência de fenômenos não faltosos, IND, com valor binário, sendo *1* para ocorrência de fenômeno não-faltoso e *0* para ocorrência de fenômeno faltoso. Esses indicadores quando unitários na lógica operacional do algoritmo desenvolvido, bloqueiam a condição de *trip* para o relé diferencial em função do distúrbio detectado no bloco 2 não ser faltoso.

Além da discriminação dos distúrbios em eventos faltosos e não-faltosos, foi desenvolvida uma lógica operacional para classificação das perturbações, avaliando se a transformada *Wavelet* apresenta informações objetivas para a correta definição de fenômeno. Nessa linha, o algoritmo classificou os eventos segundo metodologia proposta em [3] adotando para fenômenos de saturação de TC a mesma associação feita para rejeição de carga. A Tabela 5.1 apresenta a lógica operacional para classificação dos distúrbios.

Tabela 5.1 – Lógica operacional para classificação dos distúrbios

Avaliação	Classificação
$\boldsymbol{E^1 \geq T_H^1 \rightarrow IND_1 = 1}$	Energização de transformador de potência
$\boldsymbol{E^2 \geq T_H^2 \rightarrow IND_2 = 1}$	Energização solidária
$\boldsymbol{E^3 \geq T_H^3 \rightarrow IND_3 = 1}$	Sobre-excitação
$\boldsymbol{E^4 \geq T_H^4 \rightarrow IND_4 = 1}$	Saturação de TC
$\boldsymbol{E^5 \geq T_H^5 \rightarrow IND_5 = 1}$	Falta externa
$\boldsymbol{E^{1,2,3,4,5} \leq T_H^{1,2,3,4,5} \rightarrow IND^{1,2,3,4,5} = 0}$	Falta interna

5.3. Análise dos resultados

Apresenta-se a seguir a análise dos resultados obtidos através da implementação da metodologia proposta para a proteção diferencial dos TDPs a partir da TWD para os 694 casos simulados, buscando avaliar a eficácia da detecção, discriminação e classificação dos distúrbios a partir dos quais o TDP é submetido.

Antes de avaliar a implementação da TWD como sub-rotina da proteção diferencial percentual em um TDP, é necessário tomar conhecimento da nomenclatura empregada e dos tipos de gráficos apresentados. Nesse sentido, apresenta-se a descrição de cada um dos gráficos utilizados para análise de resultados:

- Gráfico de operação do relé diferencial convencional ($I_D x\ I_{RT}$) onde visualizam-se as regiões de operação e bloqueio do relé diferencial tendo como limiar de operação o fator de regulação *K*. Os pontos apresentados neste gráfico indicam os valores da corrente diferencial, I_D e da corrente de restrição, I_{RT}, sendo que quando localizados na região de operação do relé diferencial convencional, o algoritmo desenvolvido detecta a presença de um distúrbio que deve ser melhor avaliado a partir da TW;
- Gráfico *Bias* do relé diferencial convencional (plano operacional), onde apresenta-se a inclinação (limiar) para operação do relé e os pontos I_D x I_{RT};
- Gráfico dos coeficientes *wavelet* de detalhe, onde se apresentam os coeficientes de detalhe de *D1* a *D5* resultantes da decomposição do sinal a partir da TWD utilizando a técnica de AMR, bem como o coeficiente de aproximação *A5* e o sinal original;

- Gráfico da energia espectral, onde se apresentam as relações de energias expressas de (5.4) e (5.8) das três fases da corrente diferencial e o limiar de operação T_H, utilizado para discriminação e classificação do distúrbio.

5.3.1. Energização do transformador de potência

Conforme apresentado no Capítulo 4, foram simulados 38 casos de energização do transformador de potência, tendo o ângulo de chaveamento variado entre 0º e 90º em um passo de 5º e energizado a vazio e com carga.

Na análise das energizações simuladas, o relé diferencial convencional acusou operação, o que no contexto deste trabalho significa que por meio da rotina do bloco 2 foi detectado distúrbio que carece de análise detalhada em diferentes faixas de frequência, a partir da TWD a fim de evitar operação errônea e desligamento do equipamento protegido desnecessariamente. As Figuras 5.3 e 5.4 ilustram a operação do bloco 2 do algoritmo desenvolvido para um caso de energização, com ângulo de chaveamento de 10º partido a vazio.

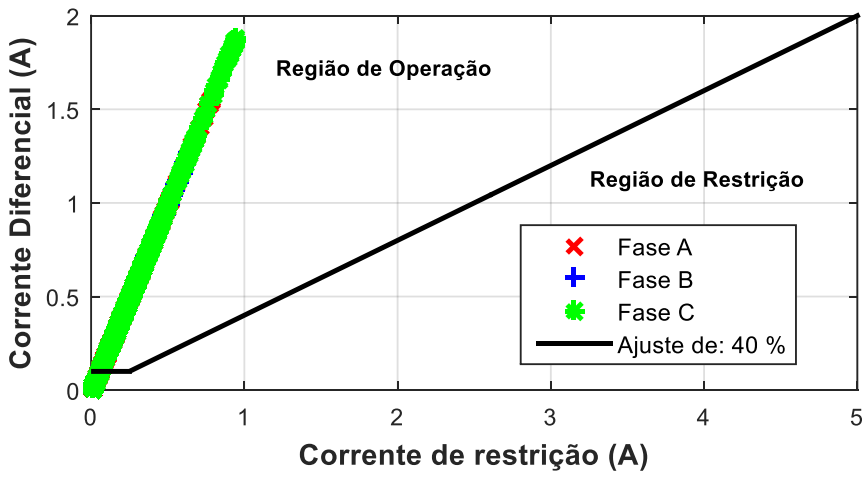


Figura 5.3 - Gráfico de operação do relé diferencial convencional para caso de energização a vazio do TDP com ângulo de chaveamento de 10º

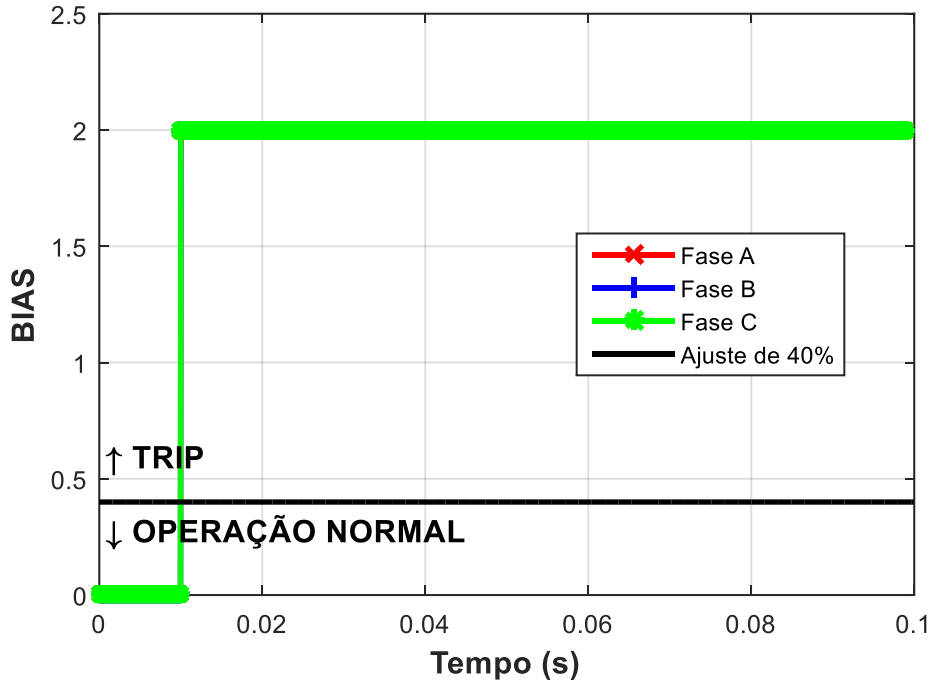


Figura 5.4 - Gráfico *bias* do relé diferencial convencional para caso de energização a vazio do TDP com ângulo de chaveamento de 10º

Os coeficientes de detalhe D1 a D5, resultantes da decomposição do sinal a partir da TWD, utilizando da técnica de AMR para a fase A com ângulo de chaveamento de 10° são apresentados na Figura 5.5. Nota-se a presença de coeficientes de detalhe em todas as faixas de frequência.

Na análise da energia espectral, observa-se pela Figura 5.6, a variação da energia espectral para todos os níveis de decomposição, com destaque para as faixas de frequências associadas às energias $E1$ e E2, destacadas pela Figura 5.7. Nesses níveis de decomposição, D1 e D2, os indicadores IND_1 e IND_2 apresentaram valores unitários em função da janela de processamento de sinais ter constatado 15 amostras acima do limite de operação. Dessa forma, o algoritmo indicou ocorrência de fenômeno especial classificado corretamente como energização de TDP.

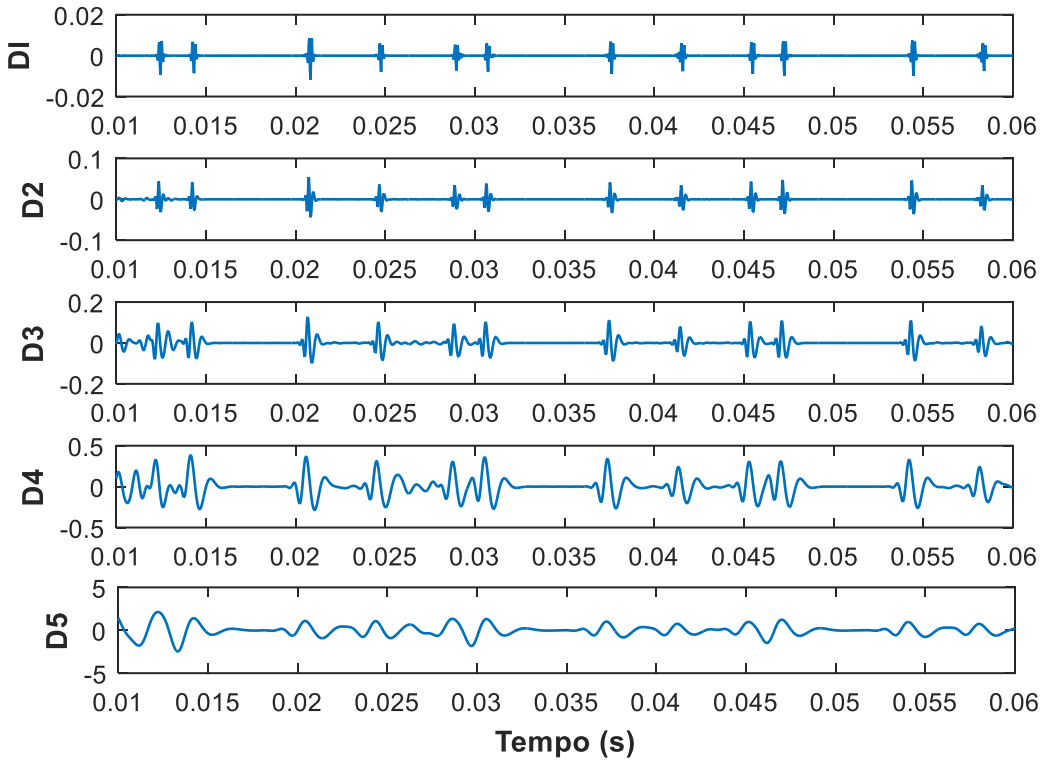


Figura 5.5 - Coeficientes de detalhe de D1 a D5 para um caso de energização de TDP

Em todos os casos simulados de energização, o relé diferencial convencional sem a incorporação da TWD como sub-rotina de operação, atuaria equivocadamente, levando ao desligamento do TDP. Na adoção da técnica de processamento de sinais a partir da TWD, o algoritmo discrimina e classifica corretamente em 100% dos casos.

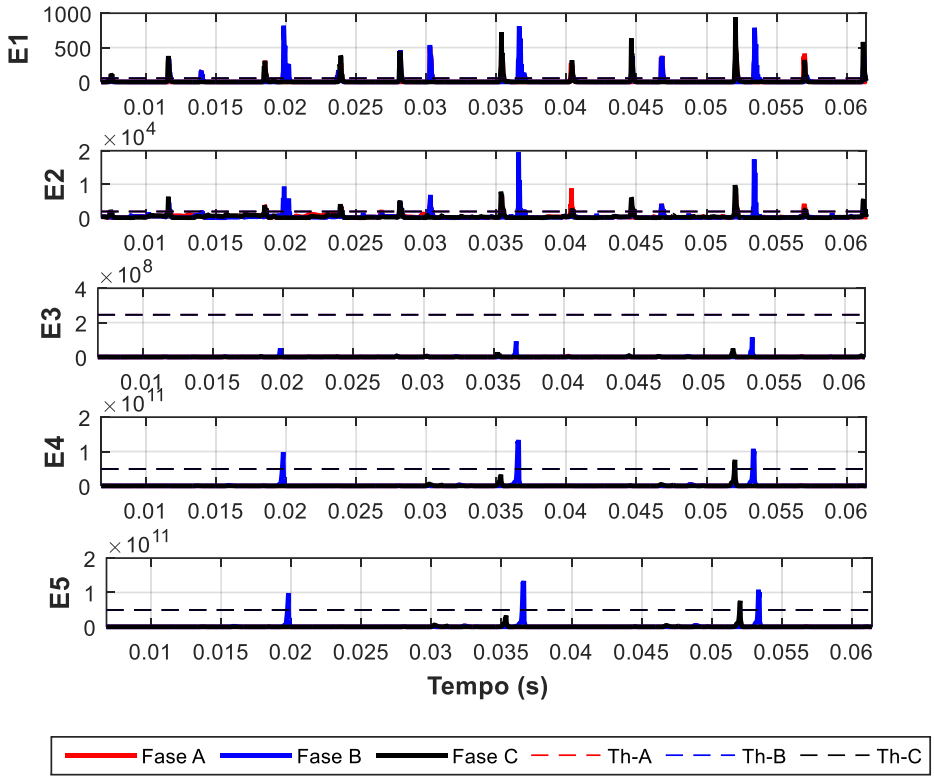


Figura 5.6 - Energias espectrais E1 a E5 para o caso de energização de TDP

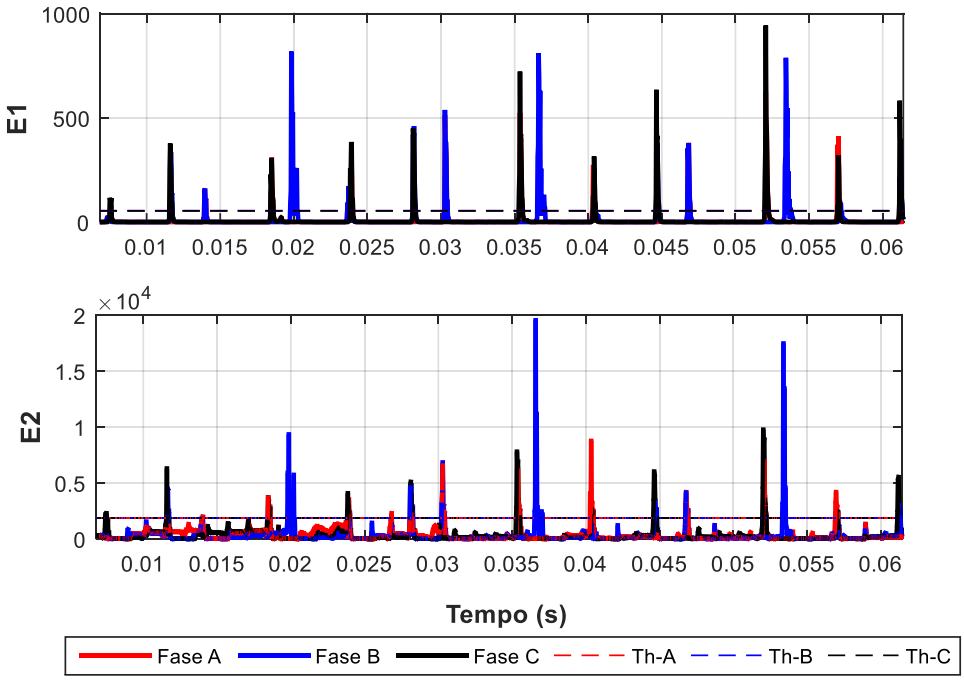


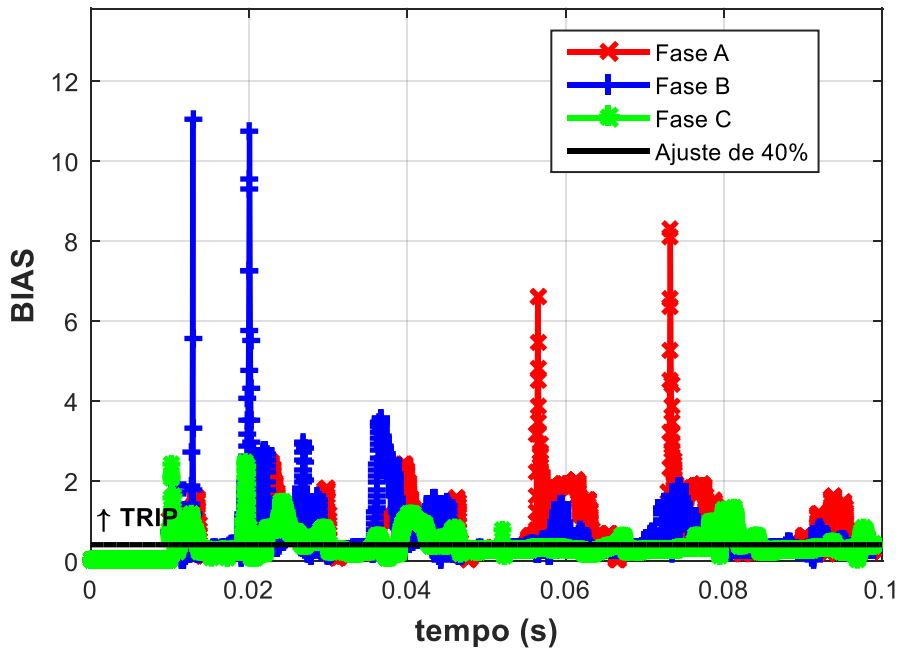
Figura 5.7 - Energias espectrais E1 e E2 para o caso de energização do TDP

5.3.2. Energização solidária

Para energização solidária foram simulados 19 casos, tendo o ângulo de chaveamento variado entre 0º e 90º em passo de 5º e com instante único de $t = 0{,}05\ s$ para energização de um TDP em paralelo a outro em operação. Os resultados foram análogos aos apresentados para energização de transformador de potência. Em 100% dos casos o relé diferencial convencional operaria erroneamente. Já na implementação do algoritmo proposto com a utilização da TWD, a metodologia é 100% eficaz na discriminação dos distúrbios faltosos de não-faltosos, porém classifica erroneamente o evento como energização de TDP em 100% dos casos.

5.3.3. Saturação de TC

Para a saturação dos TCs foram simulados 22 casos diferenciados pelo nível de saturação aplicado no TC. Em todos os casos simulados, o algoritmo detectou o distúrbio no TDP e a necessidade de aplicar sobre o sinal a decomposição em diferentes faixas de frequência a partir da TWD. A Figura 5.8 apresenta o gráfico *Bias*, ilustrando a detecção do distúrbio.



04

Figura 5.8 - Gráfico *bias* do fenômeno de saturação de TC

Na análise dos resultados do bloco 3, embora as energias espectrais $E^{1,2,3,4,5}$ tenham ultrapassado para algumas amostras na faixa de frequência do detalhe D1 o limiar de operação, elas não ocorreram em pelo menos 15 amostras na janela de processamento de sinais, indicando que mesmo com a contribuição da TWD a metodologia proposta para proteção diferencial operou erroneamente para casos de saturação de TC. A Figura 5.9 apresenta as energias espectrais calculadas para um caso de saturação de TC, a partir do qual o algoritmo não foi capaz de discriminar e classificar corretamente. Em linhas gerais, o algoritmo discriminou corretamente apenas 1 caso, enquanto que nos demais a filosofia de proteção a partir da TWD não obteve sucesso na discriminação, assim como não obteve com a classificação do distúrbio.

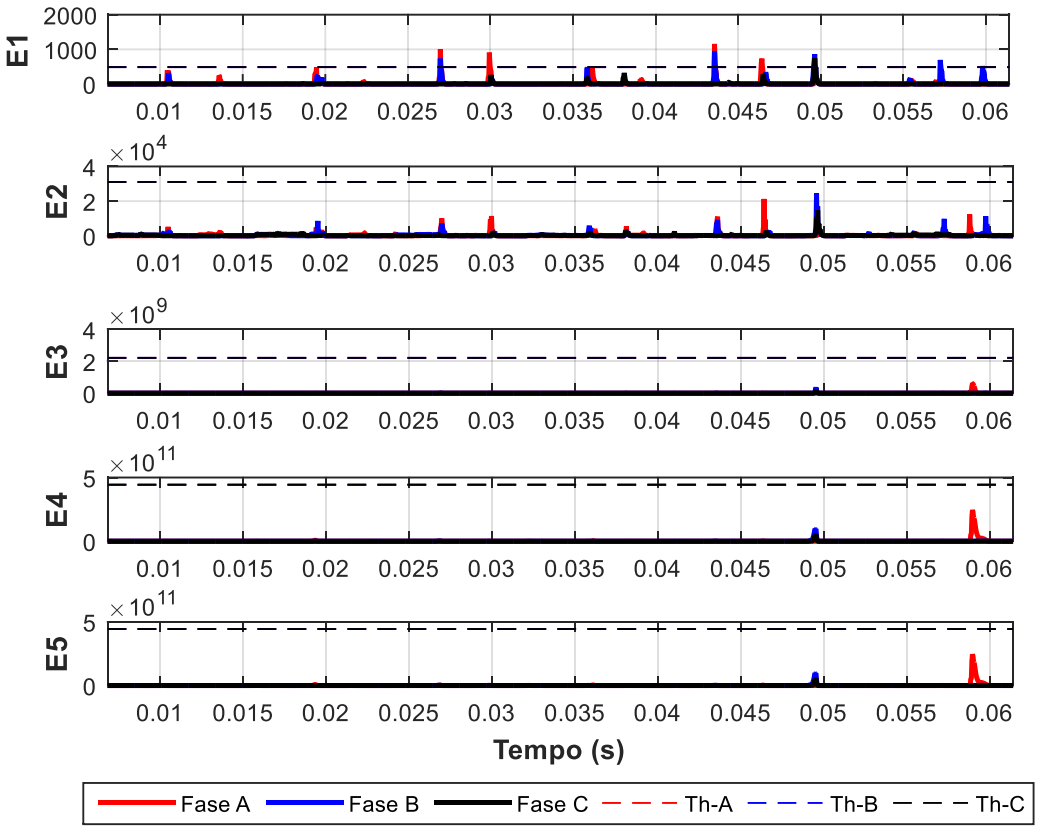


Figura 5.9 - Energias espectrais de D1 a D5 para o caso de saturação de TC

Observa-se pela Figura 5.9 para o caso de saturação de TC amostrado, a metodologia para classificação do distúrbio não teve êxito em virtude da energia associada para definição da saturação E4 não superar o limiar de operação em nenhum instante da janela de processamento.

5.3.4. Sobre-excitação

A análise a respeito do fenômeno da sobre-excitação do transformador de potência consiste em avaliar a operação da metodologia proposta para 15 casos distintos entre si. A tensão de sobre-excitação varia entre 120% e 200% da tensão nominal e o ângulo de chaveamento do gerador de tensão no instante inicial em 0°, 45º e 90°. Assim como nos fenômenos preconizados, o relé diferencial convencional atuaria em 100% dos casos simulados caso sua proteção se limitasse ao bloco 2 da estrutura operacional da metodologia proposta.

Na análise dos resultados obtidos pelo bloco 3, o algoritmo discriminou corretamente 95% dos casos a partir da energia espectral associada ao detalhe D1 conforme é destacado na Figura 5.10.

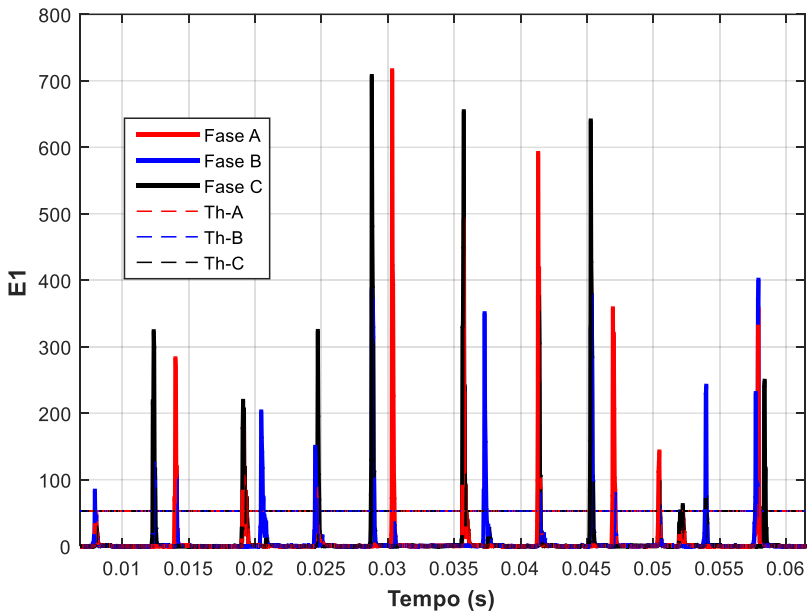


Figura 5.10 - Energia espectral do detalhe D1 para um caso de sobre-excticação

Apesar da eficácia na discriminação, a metodologia proposta para classificação de distúrbios indicou erroneamente para 100% dos casos de sobre-excitação em função da energia associada ao evento E3 não ter superado em nenhum instante o limiar de operação T_H^3, conforme se pode verificar na Figura 5.11

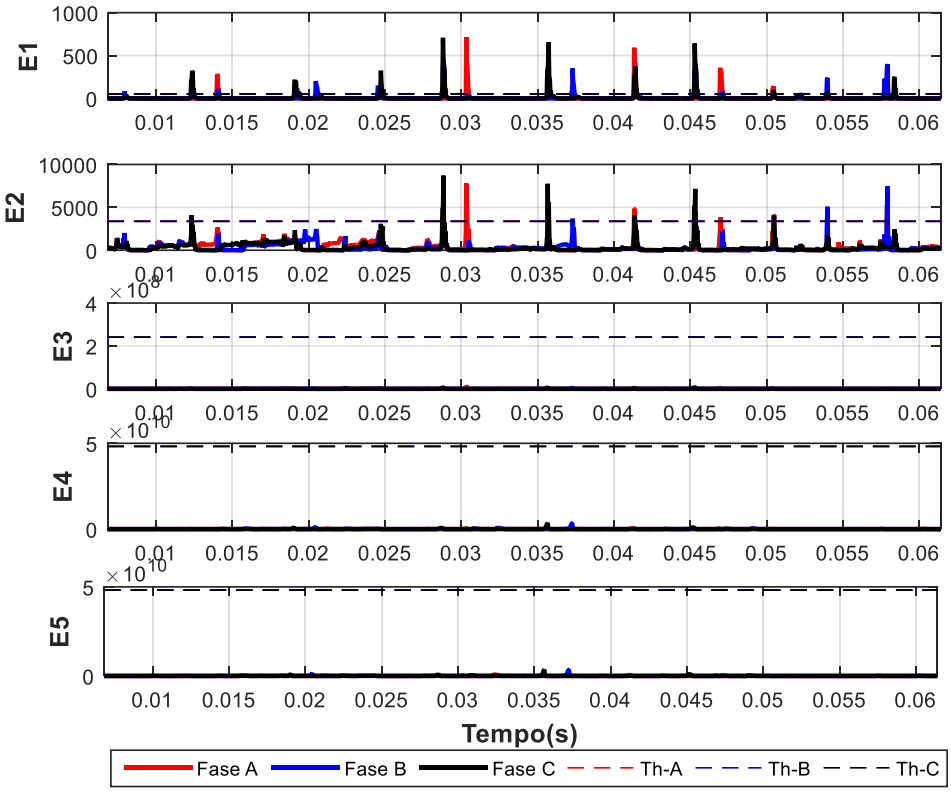


Figura 5.11 - Energias espectrais E1 a E5 para um caso de sobre-excitação

5.3.5. Falta interna

Nos 300 casos simulados para falta interna, o bloco 2 do algoritmo acusou detecção do distúrbio conforme ilustrado nas Figuras 5.12 e 5.13 para um caso de falta interna bifásica (ABT) ocasionada no instante $t = 0{,}5\ s$.

Nos casos de correntes de energização, energização solidária e sobre-excitação, os coeficientes *wavelet* de detalhe apresentaram variações em toda extensão temporal do sinal nas 6 faixas de frequências, conforme se mostra na Figura 5.5, para o caso de energização de TDP. Em faltas internas a variação dos valores dos coeficientes *wavelet* de detalhe ocorreu apenas no instante da falta interna ($t = 0{,}05\ s$) para os detalhes D1 e D2, enquanto que para os detalhes D3, D4 e D5 a variação inicia-se no instante de falta interna e perdura com magnitude menor, conforme se visualiza na Figura 5.14.

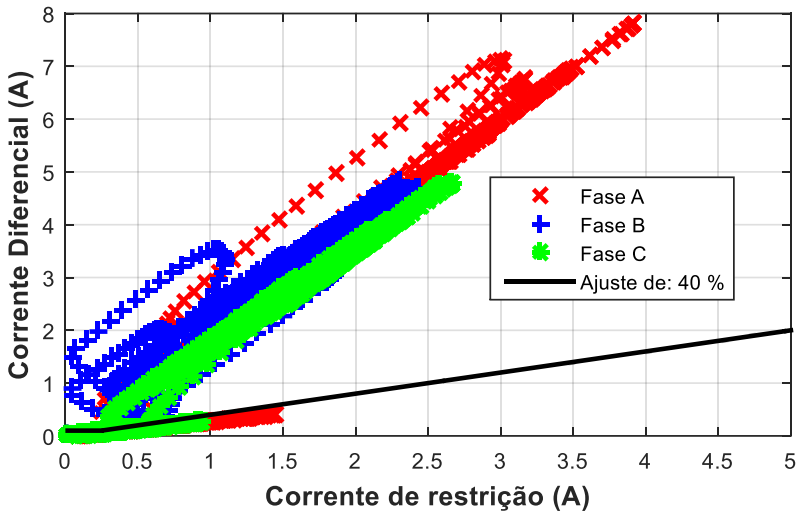


Figura 5.12 - Gráfico de operação do relé diferencial para um caso de falta interna ABT

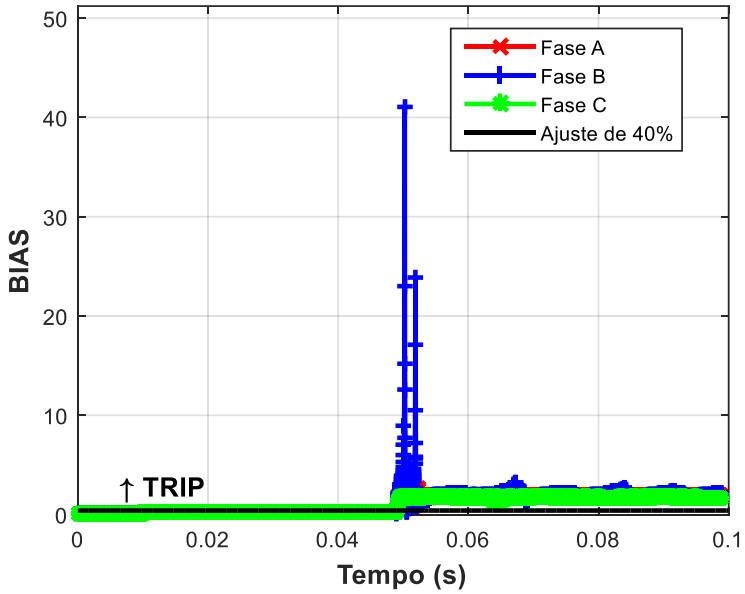


Figura 5.13 - Gráfico *Bias* do relé diferencial convencional para um caso de falta interna ABT

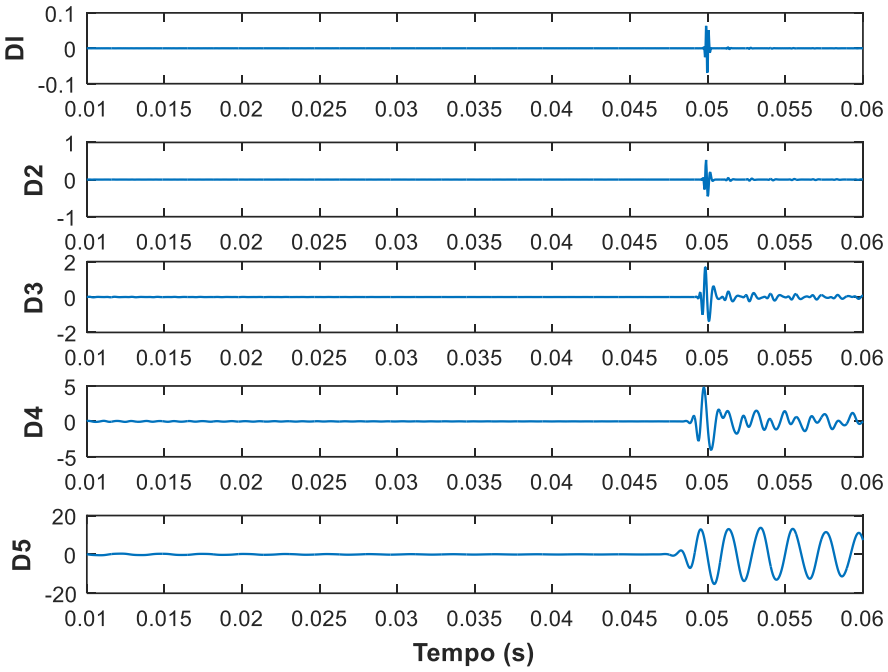


Figura 5.14 – Coeficientes *wavelet* de detalhe para um caso de falta interna bifásica terra (ABT)

Os valores resultantes dos coeficientes *wavelet* indicam que o fenômeno de falta interna no transformador de potência consiste em evento transitório de alta frequência, sendo visualizado em todas as faixas de detalhe, porém restrito ao instante de surgimento da falta interna. Dessa forma, a variação da energia espectral dos coeficientes *wavelet* de detalhe, D1 a D5, é estabelecida apenas nesse instante, ou seja, sendo nula em instantes posteriores ao evento da falta interna. A Figura 5.15 comprova que a variação da energia espectral se limita ao instante de falta interna.

Essa característica observada na análise dos coeficientes *wavelet* comprovada pela Figura 5.15 é importante para discriminação de eventos faltosos de não-faltosos, onde a variação da energia espectral perdura ao longo de toda a extensão temporal do sinal. Nessa linha, mesmo observando que a energia espectral dos coeficientes de detalhe da corrente diferencial de uma falta interna ultrapassa o limiar de operação, $TH^{1,2,3,4,5}$, conforme condição expressa em (5.10) , ela não prevalece em 15 amostras da janela de processamento de sinais como ocorre para os eventos não-faltosos.

Em todos os 300 casos simulados, o algoritmo discriminou e classificou corretamente o fenômeno como evento faltoso, confirmando que a metodologia proposta foi capaz de discriminar corretamente os fenômenos de faltas internas de eventos não-faltosos.

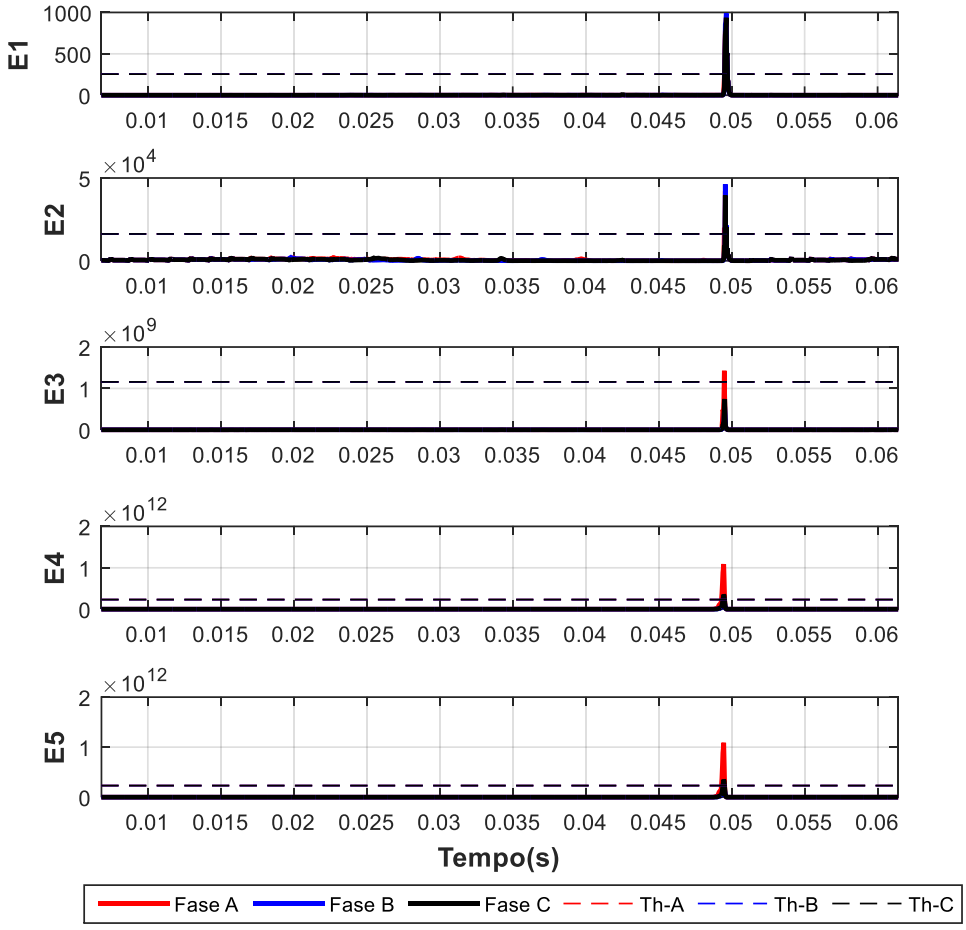


Figura 5.15 - Energias espectrais dos coeficientes *wavelet* de detalhe para um caso de falta interna bifásica terra (ABT)

5.3.6. Falta Externa

Diferentemente dos fenômenos observados, os 300 casos simulados para falta externa não constituíram problema para análise do relé diferencial convencional. Em 100% dos casos avaliados, o relé diferencial convencional não detectou o distúrbio, operando corretamente sem que exigisse o processamento de sinais a partir da TWD. Na Figura 5.16 apresenta-se o gráfico *bias* ilustrando a correta operação do relé diferencial frente a condições de falta externa.

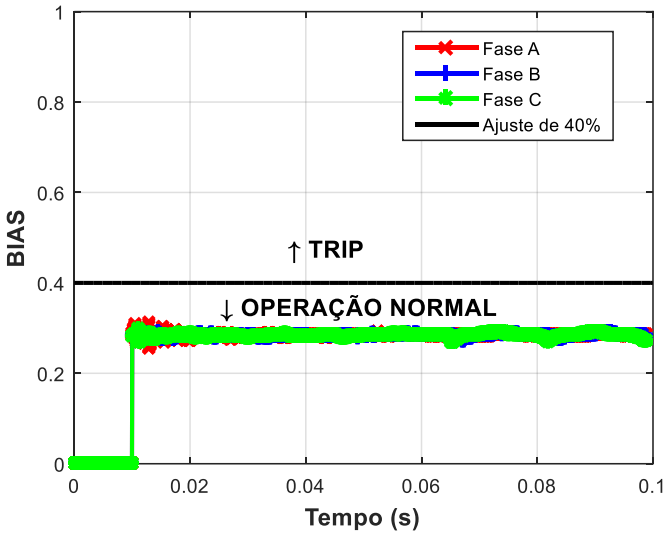


Figura 5.16 - Gráfico *bias* para um caso de falta externa

5.3.7. Análise geral

A implementação da TWD como sub-rotina de operação da proteção diferencial para transformadores de potência mostrou celeridade na discriminação dos distúrbios demandando tempo de 13 *ms* para bloqueio da condição de *trip* para eventos não faltosos, estando dentro dos padrões para proteção de transformadores, mostrando que este algoritmo apresenta resultados satisfatórios em termos de tempo de resposta.

Com a relação à sua eficácia na discriminação e classificação dos distúrbios simulados, o algoritmo obteve sucesso na discriminação dos distúrbios de eventos faltosos e não faltosos acertando 97,12% dos casos simulados. Na ausência do bloco 3 de implementação da TWD sobre as correntes diferenciais, isto é, o algoritmo sendo limitado a execução apenas do bloco 2, o relé discriminou corretamente 86,46% dos casos simulados. Portanto, uma melhoria de aproximadamente 11% dos casos simulados. Os resultados para classificação dos distúrbios simulados não acompanharam a mesma melhoria da operação de discriminação dos distúrbios. O algoritmo foi capaz de classificar corretamente 91,93% dos casos, uma melhoria de 5,5%.

A Tabela 5.2 consolida os resultados de assertividade na definição dos casos simulados na execução do processamento de sinais limitado ao bloco 2, onde se simula a operação de um relé diferencial convencional, para discriminação e classificação dos distúrbios.

Tabela 5.2 – Resultados do algoritmo proposto a partir da TWD

Evento	Nº de Casos Simulados	Relé Diferencial Convencional	Proposto Discriminação	Proposto Classificação
Energização	19	0,00%	100,00%	100,00%
Energização com Carga	19	0,00%	100,00%	100,00%
Energização Solidária	19	0,00%	100,00%	0,00%
Falta Externa	300	100,00%	100,00%	100,00%
Falta Interna	300	100,00%	100,00%	100,00%
Saturação de TC	22	0,00%	18,18%	0,00%
Sobre-excitação	15	0,00%	86,67%	0,00%
Total Geral	**694**	**86,46%**	**97,12%**	**91,93%**

Na análise por evento simulado, observa-se pela Tabela 5.2 que o algoritmo obteve êxito de 100% tanto na discriminação quanto na classificação dos distúrbios para os eventos de energização de TDP, faltas internas e faltas externas.

Em termos de falhas operacionais, isto é, atuação errônea da proteção diferencial perante condições especiais, o algoritmo proposto carece de atenção especial na análise dos sinais dos eventos de sobre-excitação e principalmente de saturação de transformadores de corrente, cujo percentual de assertividade correspondeu a 86,87% e 18,18% respectivamente.

No tocante à classificação dos distúrbios não-faltosos, os erros absolutos na identificação de fenômenos de energização solidária, saturação de TC e sobre-excitação não são prejudiciais a segurança do SEP, pois tratam-se de informação que busca orientar as equipes de manutenção no procedimento de análise do evento ocasionado no SEP.

5.4. Considerações finais

Neste capítulo apresentou-se a metodologia de proteção proposta a partir da TWD para análise das 694 simulações executadas no SEP modelado no Capítulo 4. Foram apresentados e analisados para cada evento simulado os resultados obtidos pelo algoritmo desenvolvido. Por fim, apresentam-se os resultados consolidados para cada evento simulado, apontando as deficiências na análise dos fenômenos em termos de discriminação e classificação do distúrbio.

Capítulo 6- Conclusão

Este trabalho concentrou-se em desenvolver um algoritmo capaz de discriminar e classificar os distúrbios aos quais o transformador de potência é submetido a partir da análise de sinais aplicando a transformada *Wavelet*. Essa transformada permitiu uma análise robusta das formas de onda associadas à transitórios eletromagnéticos, caracterizados por sinais não periódicos com oscilações de alta frequência, e possibilita a análise dos fenômenos elétricos em diferentes resoluções a partir da decomposição do sinal em altas e baixas frequências. O algoritmo de proteção foi utilizado como uma sub-rotina de operação dentro da configuração de um relé convencional.

Para avaliação do desempenho do algoritmo proposto a partir do processamento de sinais pela transformada *Wavelet* Discreta, foram modelados os componentes elétricos de um sistema elétrico de potência a partir do *software* ATP. Com o sistema elétrico simulado foi possível avaliar diferentes distúrbios, reproduzindo satisfatoriamente o surgimento de transitórios eletromagnéticos. Ao todo foram simulados 694 casos, contemplando eventos como falta externas, faltas internas, energização do TDP, energização solidária, sobre-excitação e saturação de TC.

O processamento de sinais a partir da decomposição do sinal em 6 níveis pela TWD permitiu avaliar o sinal sobre diferentes faixas de frequência. A energia espectral calculada correspondeu em critério suficiente para discriminação dos distúrbios em eventos faltosos e não faltosos, tendo êxito em aproximadamente 97% dos casos simulados, melhorando o desempenho da proteção diferencial em 11%. Em contrapartida, a classificação dos distúrbios não foi bem sucedida na análise dos fenômenos de energização solidária, saturação de TC e sobre-excitação tendo assertividade em aproximadamente 92% dos casos simulados, uma melhoria de 5,5% perante à classificação binária (falta interna ou externa) do relé diferencial convencional.

Adicionalmente a eficácia do algoritmo na discriminação dos distúrbios, comprovou-se que a metodologia é célere na discriminação dos distúrbios, demandando tempo de 13 ms para definição se o evento é faltoso ou não-faltoso, estando dentro dos padrões de proteção de transformadores, mostrando que este algoritmo apresenta resultados satisfatórios em termos de tempo de resposta.

6.1. Sugestões para trabalhos futuros

Os resultados apresentados para discriminação de distúrbios a partir da TWD mostraram-se promissores. No entanto, a metodologia de classificação dos distúrbios carece de técnicas que melhorem o seu desempenho. Nesse sentido, sugere-se como propostas para trabalhos os seguintes estudos:

- Para melhoria da modelagem do sistema elétrico de potência:
    - Avaliação de ocorrências de sub-frequência e sobre-frequência ocasionadas por cargas não-lineares e gerador síncrono;
    - Modelagem do transformador de potência a partir do modelo híbrido, disponível no ATP, com objetivo de simular faltas internas entre os enrolamentos do transformador de potência;
- Simulação de casos de rejeição de carga e remoção de faltas externas próximas ao TDP;
- Estudo comparativo com associação das técnicas de restrição e bloqueio de harmônicos;
- Avaliação do algoritmo desenvolvido perante registros reais de faltas e energizações em um transformador;
- Associação da técnica de processamento de sinais a partir da transformada *wavelet* com a técnicas de inteligência artificial como RNA, SVM ou lógica *Fuzzy* com objetivo de melhorar os resultados relacionados a classificação dos distúrbios;
- Implementação da transformada *wavelet* discreta tratando o efeito de borda provocado pelo processamento do sinal;
- Implementação do algoritmo em relés diferenciais reais a fim de comparar o tempo de operação obtido pelo presente trabalho para discriminação dos eventos em situações normais, especiais e de falta interna.

Referências Bibliográficas

[1] Y. G. Paithankar e S. R. Bhide, **Fundamentals of power system protection**, India: Prentice Hall, 2004.

[2] IEEE Power & Energy Society, **IEEE Std. C37.91. Guide for protecting power transformer,** New York: IEEE, 2008.

[3] M. O. Oliveira, **Proteção diferencial adaptativa de transformadores de potência baseada na análise de componentes wavelets**, Tese de doutorado apresentada ao programa de pós-graduação em engenharia elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2013.

[4] A. P. Bernardes, **Esquema Completo de Proteção Diferencial de Transformadores para Testes em um Relé Digital**, Dissertação de Mestrado à Escolha de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, 2006.

[5] S. H. Horowitz e A. G. Phadke, **Power system relaying 3rd ed.**, Baldock: Research Studies Press, 2008.

[6] H. Monsef e S. Lofifard, **Internal fault current identification based on wavelet transform in power transformer**, Electric Power System Research, v. 77, pp. 1637-1645, 2007.

[7] M. C. M. Pena, **Falhas em transformadores de potência:** uma contribuição para análise, definições, causas e soluções, Dissertação de mestrado em engenharia elétrica, Universidade Federal de Itajubá,, p. 148, 2003.

[8] J. F. Fernandes, **Proteção diferencial de transformadores de potência baseada em máquinas de vetor de suporte e transformada wavelet**, Dissertação de mestrado apresentada ao programa de pós-graduação em engenharia elétrica e de computação da UFRN, p. 94, 19 Dezembro 2017.

[9] M. O. Oliveira, **Proteção diferencial de transformadores trifásicos utilizando a Transformada Wavelet**, Dissertação de mestrado apresentada ao programa de pós-Graduação em engenharia elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, p. 129, Março 2009.

[10] P. M. Anderson, **Power System Protection**, New York: IEEE Press. 1307 p., 1999.

[11] G. Kindermann, **Proteção de Sistemas Elétricos de Potência**, Floarianopólis: UFSC-EEL-LABPLAN, 2005.

[12] ANSI/IEEE, **Standard Electrical Power System Device Function Numbers, Acronyms, and Contact Designations**, 2008.

[13] M. G. Malafaia, **Sistema de proteção de Transformadores de Extra-Alta Tensão Utilizando Relés Digitais**, Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Escola Politécnica, UFRJ, Fevereiro 2017.

[14] S. V. Kulkarni e S. A. Khaparde, **Transformer Engineering:** design and practice, New York-Basel: Marcel Dekker, INC, 2004.

[15] A. Guzmán, S. Zocholl e G. a. A. H. J. Benmouyal, **A Current-Based Solution for Transformer Differencial Protection** – Part I: Problem Statement," IEEE Transactions on Power Delivery, vol.16, n.4, pp. p. 485-491, 2001.

[16] C. I. Dos Santos, **Modelagem do Relé de Proteção Diferencial Tipo BDD15BGE,** Dissertação (Mestrado em engenharia) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, p. 87 fls, 2006.

[17] D. Gabor, **Theory of Communication**, Part 1," J. Inst. of Elect. Eng. Part III, Radio and Communication, vol 93, p. p. 429, 1946.

[18] S. H. Jaramillo, G. T. Heydt, E. O'Neill-Carrilo e A. Mariscotti, **Discussion on Power quality indicees for aperiodic voltage and currentes**, Power Delivery, IEEE Transactions on, Vol 15 Issue 4, October 2000.

[19] P. H. G. L. Silva, **Proteção Diferencial de Transformadores Usando a Transformada Wavelet**, Dissertação de Mestrado de Engenharia Elétrica apresentada à Faculdade de Engenharia – UNESP., 2014.

[20] L. H. C. Verney, **Desempenho da proteção diferencial em transformadores de potência perante condições especiais de proteção**, Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina, 2012.

[21] A. Guzman, S. Zocholl, G. Benmouyal e H. J. Altuve, **Performance Analysis of Traditional and Improved Transformer Differential Protective Relays** Schweitzer Engineefing Laboratories, 2000.

[22] C. J. Mozina, **Improvements in Protection and Comissioning of Digital Transformer Relays at Medium Voltage Industrial Facilities**, em Pulp and Paper Industry Technical Conference - PIPC, 2011.

[23] C. Warrington, **Protective relays**, Vol. 2, Wiley & Sons, 1962.

[24] A. Gusman, N. Fischer e C. Labuschagne, **Improvements in Transformer Protection and Control**,Schweitzer Engineering Laboratories, 2009.

[25] L. L. Cerva, **Desenvolvimento de uma máquina síncrona com imãs permanentes**, Tese de Doutorado. UFRGS, 2014.

[26] N. Chiesa, **Power Transformer Modeling for Inrush Current Calculation**, Thesis for the degree of Philosophiae Doctor Norwegian University of Science and Technology, June 2010.

[27] L. S. Piovesan, **Avaliação de Algoritmo para Proteção Diferencial de Transformadores**, Tese de Dissertação, pp. USP, SP, 1997.

[28] C. F. Ribeiro, **Correntes Transitórias de Energização dos Transformadores**, Curso Especial de Distribuição de Energia Elétrica, Universidade Federal de Pernambuco, Recife,, 1982.

[29] W. A. Elmore, **Protective Relaying**: Theory and Applications, 1994.

[30] J. C. Oliveira, J. R. Cogo e J. P. G. Abreu, **Transformadores: teoria e ensaios**, São Paulo: Edgard Blucher LTDA, 1984.

[31] R. J. N. Alencar e U. H. Bezerra, **Power Transformer Differential Protection Through Gradient of the Differential Current**, Journal of Control, Automation and Electrical System, vol. v.24, pp. 162-173, 2013.

[32] J. P. Marques, **Proteção de Transformadores de Potência e Classificação de Transitórios Elétricos por meio da Transformada Wavelet Discreta**, Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2014.

[33] Y. Wang, X. Yin, D. You e T. Xu, **Analysis on the Influencing Factors of Transformer Sympathetic Inrush Current**, IEEE/PES General Meeting, pp. 1-8, 2008.

[34] G. B. Kumbhar e S. V. Kulkarni, **Analysis of Sympathetic Inrush Phenomenon in Transformer Using Coupled Field-Circuit Approach,** IEEE/PES General Meeting, pp. 1-6, 2007.

[35] Ê. C. Segatto, M. C. Tavares, D. V. Coury e P. E. G. Campos, **Alto Desempenho na proteção diferencial de Transformadores de Potência com a Utilização de Redes Neurais Artificiais,** Revista Controle & Automação, Vol 14 no 3, pp. 309-320, Julho, Agosto e Setembro 2003.

[36] R. L. d. Abreu, **Modelagem e Simulação de Transformadores, sob condições transitórias, levando em consideração os efeitos de saturação e histerese do núcleo ferromagnético,** Dissertação de Mestrado UFMS, Setembro 2011.

[37] A. I. Megahed, A. Ramadan e W. Elmahdy, **Power Transformer Differential Relay Using Wavelet Transform Energies**, IEEE Power and Energy Society General Meeting, pp. 20-24, July 2008. Proceedings…Piscataway, NJ: IEEE 2008..

[38] R. P. d. Medeiros, **Proteção Diferencial de Transformadores de Potência utilizando a transformada wavelet com efeitos de borda,** Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação da UFRN, Dezembro 2017.

[39] J. F. Fernandes, F. B. Costa e R. P. d. Medeiros, **Power transformer disturbance classification based on the wavelet transform and artificial neural networks,** 2016 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN). [S.l.: s.n.], pp. 640-646, 2016.

[40] P. H. G. Leonel e J. R. S. Mantovanni, **Proteção Diferencial de Transformadores Utilizando a Transformada Wavelet**, Anais do XX Congresso Brasileiro de Automática, pp. 676-683, 20 a 24 Setembro 2014.

[41] M. S. P. Panah, J. Azarakhsh e Z. Raisi, **A Novel Method in Differential Protection of Power Transformer Using Wavelet Transform and Correlation Factor Analysis**, Bulletin de la Société Royale des Sciences de Liège, Vol. 85, pp. 1119-1135, 2016.

[42] D. Barbosa, U. C. Netto, D. V. Coury e M. Oleskovicz, **Power transformer differential protection based on clarke's transform and fuzzy systems**, IEEE Trans. Power Del., v. 26, n. 2, pp. 1212-1220, 2011.

[43] M. Tripathy, R. P. Maheshwari e H. K. Verma, **Radial Basis Probabilistic Neural Network for Differential Protection of Power Transformer**, IET Generation, Transmission & Distribution, United Kingdom, IET Research Journal, pp. p 43-52, Jan. 2008.

[44] U. C. N. D. V. C. e. M. O. D. Barbosa, **Power Transformer Differential Protection Based on Clarke's Transform and Fuzzy Systems**, IEEE Transactions on Power Delivery, 2011.

[45] B. e. a. Kasztenny, **A self-organizing fuzzy logic based protective relay-an application to power transformer protection**, IEEE Transactions on Power Delivery, v. 12, n. 3, pp. 119-1127, Jul 1997.

[46] A. a. J. M. Grossmann, **Decomposition of Hardy functions into square integrable wavelet of constant shape**, SIAM J. Math. Anal. , 15, pp. 723-736, 1984.

[47] A. Haar, **Zur theorie der orthogonalen functionen-systeme**, Mathematische Annalen Berlin, v.69, pp. 331-371, 1910.

[48] I. Daubechies, **Ten Lectures on Wavelets**, SIAM, 357pp., 1992.

[49] S. Mallat, **A Wavelet Tour of signal Processing**, Academic Press, 1998.

[50] D. Barbosa, **Sistema Híbrido Inteligente para o monitoramento e proteção de transformadores de potência**, Tese de Doutorado-Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Área de Concentração em Sistema Elétrico de Potência - EESC/USP, São Paulo 2010.

[51] P. L. Mao, Z. Q. Bo, R. K. Aggarwal e R. M. Li, **A Novel Approach to the Classification of the Transient Phenomena in Power Transformer Using Combined Wavelet Transform and Neural Network**., IEEE Transaction on Power Delivery, pp. 654-660, Oct. 2001.

[52] M. Geethanjali, S. M. R. Slochanal e R. Bhavani, **A Novel Approach for Power Transformer Protection Based Upon Combined Wavelet Transform and Neural Network (WNN)**, Power Engineering Conferenece, 7., 2005.

[53] P. L. Mao e R. K. A. Aggarwal, **Wavelet Transform Based Decision Making Logic Method for Discrimination Between Internal Faults and Inrush**

Currents in Power Transformer, Electrical Power and Energy System, Elsevier Science Ltd. v22, pp. 389-395, 2000.

[54] J. Martinez, R. Walling, B. Mork, J. Martin-Arnedo e D. Durbak, **Parameter determination for modeling system transients-Part III: Transformers**, IEEE Transaction on Power Delivery, Piscataway, NJ, v. 20, n. 3, pp. 2051-2062, Julho 2005.

[55] M. Domingues, O. Mendes, M. Kaibara, V. Menconi e E. Bernardes, **Explorando a transformada wavelet contínua**, Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 38, nº 3, 2016.

[56] P. S. R. Diniz, E. A. Da Silva e N. S. L., **Processamento Digital de Sinais:** projeto e análise de sistemas, Porto Alegre: Bookman, 2007. 590 p., 2007.

[57] A. J. R. Reis e A. P. A. d. Silva, **Aplicação da transformada wavelet discreta na previsão de carga a curto prazo**, Revista Controle & Automação/Vol.15 no.1, Jan., Fev. e Março 2004.

[58] D. V. Coury, H. M. G. C. Branco e D. O. M. Barbosa, **Classification of events in power transformers using wavelet packet transform and fuzzy logic**, Journal Control Automatic Electric Systems, New York, v. 24, n. 3, pp. 300-311, 2013.

[59] D. C. Mallat, **A Theory for Multiresolution Signal Decomposition: the wavelet singlephase transformer**, IEEE Transaction on Magnetics, Piscataway, v. 24, n. 6,, pp. 3217-3222, Nov. 1988.

[60] A. M. Shah e B. R. Bhalja, **Discrimination between internal faults and other disturbances in transformer using the support vector machine-based protection scheme**, IEEE Trans. Power Del., v. 28, n. 3,, pp. 1508-1515, 2013.

[61] S. Sendilkumar, B. L. Mathur e J. Henry, **Differential Protection for Power Transformer Using Wavelet Transformer and PNN**, World Academy of Science, Engineering and Technology - International Journal of Electrical and Computer Engineering, pp. Vol:4, No:3, 2010.

[62] K. A. Tavares, **Modelagem e Simulação da Proteção Diferencial de Transformadores de Potência no ATP**, Dissertação (mestrado)—Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Elétrica, Faculdade de Tecnologia, 2013.

[63] J. MARTI, **Accuarte Modelling of Frequency-Dependent Transmission Lines in Electromagnetic Transient Simulations**, Power Apparatus and Systems. IEEE Transactions on, v. PAS-101, n. 1, pp. 147-157, 1982.

[64] Electrical Systems, **Transmission Tower Types**, Electrical Systems, February 2011. [Online]. Disponível: https://www.skm-eleksys.com/2011/02/transmission-tower-types.html. [Acesso em 28 Janeiro de 2019].

[65] J. M. Filho, **Manual De Equipamentos Elétricos** - 4 edição, LTC, 2005.

[66] A. C. Caminha, **Introdução à proteção dos sistemas elétricos**, São Paulo: Edarg Blucher, 1977.

[67] R. Folkers, **Determine Current Transformer Suitability Using EMTP Models**, Schweitzer Engineering Laboratories, Inc., Pullman, WA USA, 1999.

[68] J. A. Martinez-Velazco, **Power System Transients:** Parameter Determination, Boca Raton: CRC Press, 2010.

[69] D. e. a. Povh, **Calculation of Transient Phenomena**, Athens Power Tech Conference, 1993, Athens. Proceeding. Athens: IEEE, pp. 738-743, 1993.

[70] E. A. G. Marín, **Modelagem e Simulação De Faltas Internas Entre Espiras Em Transformadores De Potência Para Avaliação De Funções De Proteção**, Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, p. 186 p., 2016.

[71] J. A. Martinez e B. A. Mork, **Transformer modeling for low – and mid-frequency transient –** a review., IEEE Transaction on Power Delivery, Piscataway,v. 20, n. 2, pp. 1625-1632, 2005.

[72] L. B. Viena, **Modelagem de Transformadores no Programa ATP para o Estudo do Fenômeno da Ferroressonância** Dissertação apresentada ao Programa de PósGraduação em Engenharia Elétrica da UFBA, 2010.

[73] ATP, **Alternative transients program - rule book**, Leuven EMTP Center..

[74] J. A. Martinez-Velasco e B. A. Mork, **Transformer Modeling for Low Frequency Transients - The State of the Art**, International Conference on Power Systems Transients – IPST 2003 in New Orleans, USA, pp. 1-6, 2003.

[75] A. R. d. Conti, **Modelagem de Transformadores**,55 slides, 2013.

[76] N. H. G. Silva, **Avaliação da Operação da Proteção Diferencial em Transformadores de Potência**, Dissertação de graduação submetida ao Departamento de Engenharia Elétrica do CEFET-MG, 2015.

[77] M. M. Y. Tomasevich, **Modelos de Linhas de Transmissão usando representação racional de matriz de admitância nodal e decomposição idempotente**, Dissertação de Mestrado, UFRJ, 2011.

[78] O. P. Hevia, **Comparación de los modelos de línea del ATP** Revista Iberoamericana del ATP, v. 1, n. 1, pp. 1-11, Março 1999.

[79] C. Mardegan, **Transformadores de corrente, potencial e bobinas de Rogowski para fi ns de proteção** – Parte I, Proteção e Seletividade - Revista O setor Elétrico, pp. 22-31, 2010.

[80] D. S. Gopika R, **Study on Power Transformer Inrush Current,** IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering (IOSR-JEEE) , pp. 59-63, 2017.

[81] F. F. Andrade, **Transmissão de Energia Elétrica (LTE)**, Nota de aula do curso Graduação em Engenharia Elétrica da UDESC Joinville, 2011.

[82] F. P. De Mello, **Proteção de Sistemas Elétricos de Potência**, Santa Maria, RS: Imprensa Universitária - Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), 1979.

[83] D. C. e. a. Robertson, **Wavelet and Electromagnetic Power System Transients,** IEEE Transaction on Power Delivery, Piscataway, v. 11, n. 2,, pp. 1050-1058, April 1996.