

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**Jeferson Prates Marques**

**METODOLOGIA PARA DETECÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE  
FALTAS EM TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA POR MEIO DA  
TRANSFORMADA WAVELET DISCRETA**

Santa Maria, RS  
2018

**Jeferson Prates Marques**

**METODOLOGIA PARA DETECÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE FALTAS EM  
TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA POR MEIO DA TRANSFORMADA  
WAVELET DISCRETA**

Tese apresentada ao Curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Processamento de Energia, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do grau de **Doutor em Engenharia Elétrica**

**Orientador: Ghendy Cardoso Junior, Dr. Eng.**

Santa Maria, RS  
2018



Marques, Jeferson Prates  
Metodologia para Detecção e Classificação de Faltas em  
Transformadores de Potência por meio da Transformada  
Wavelet Discreta / Jeferson Prates Marques.- 2018.  
100 p.; 30 cm

Orientador: Ghendy Cardoso Junior  
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa  
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Elétrica, RS, 2018

1. Proteção de transformadores de potência 2.  
Correntes de Inrush 3. Proteção diferencial 4.  
Transformada Wavelet I. Cardoso Junior, Ghendy II.  
Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

---

©2018

Todos os direitos autorais reservados a Jeferson Prates Marques. A reprodução de partes ou de todo este trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

Endereço: Rua Felipe de Oliveira, 40, apt 502, Centro, Santa Maria, RS, 97015-250

Fone: (+55) 55 99606-4716; E-mail: jefersonjpm.ee@gmail.com

**Jeferson Prates Marques**

**METODOLOGIA PARA DETECÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE FALTAS EM  
TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA POR MEIO DA TRANSFORMADA  
WAVELET DISCRETA**

Tese apresentada ao Curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Processamento de Energia, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do grau de **Doutor em Engenharia Elétrica**

Aprovado em 28 de agosto de 2018:

---

Ghendy Cardoso Junior, Dr. (UFSM)  
(Presidente/Orientador)

---

Fernando Augusto Moreira, Dr. (UFBA) - Videoconferência

---

Gustavo Marchesan, Dr. (UNIPAMPA)

---

Luiz Fernando de Freitas Gutierrez, Dr. (UNIPAMPA)

---

Adriano Peres de Moraes, Dr. (UFSM)

Santa Maria, RS

2018

## **DEDICATÓRIAS**

À minha querida mãe pelo amor e carinho, pela educação e incentivo a buscar meus objetivos, não importando o quão difíceis possam parecer.

Ao meu irmão pelo apoio, conselhos e incentivos durante a caminhada deste desafio.

À minha querida esposa Vanessa, pelo seu amor, carinho e apoio incondicional em todos os momentos. Não há palavras para lhe agradecer pela compreensão durante os momentos que tive que me ausentar para alcançar este objetivo. Te amo!

À minha família pelo amor, educação e apoio.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à toda a minha família, pois são os pilares de minha educação e conquistas.

Agradeço à UFSM e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica pela oportunidade dada em fazer parte desta grande instituição de ensino.

Ao professor Ghendy Cardoso Jr. pela excelente orientação dada durante este trabalho.

Ao professor Adriano Peres de Moraes pela ajuda e aconselhamentos durante o processo de publicação deste trabalho.

Agradeço ao colega Carlos Lázaro Menco pela amizade, aconselhamentos e apoio durante as publicações deste trabalho.

Agradeço ao Cel. Crisóstomo e Cel. Ventorini pelo incentivo e ajuda para o cumprimento dos créditos durante o Doutorado. Aço!

Agradeço a todos os colegas do CEESP pela receptividade, apoio e amizade.

Agradeço a todos os amigos pelo apoio e incentivo durante esses anos de estudos, mesmo quando me ausentei das junções e confraternizações.

Enfim, agradeço a todos que de alguma maneira me ajudaram a chegar até aqui.

Muito Obrigado!

*"Quando pensei em desistir, me lembrei dos motivos que me fizeram chegar até aqui"*

Autor desconhecido

## RESUMO

# METODOLOGIA PARA DETECÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE FALTAS EM TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA POR MEIO DA TRANSFORMADA WAVELET DISCRETA

AUTOR: JEFERSON PRATES MARQUES

ORIENTADOR: GHENDY CARDOSO JUNIOR, Dr. Eng.

Este trabalho de tese apresenta o desenvolvimento de uma metodologia para detecção e classificação de transitórios elétricos em transformadores de potência, para fins de proteção. Para isso foram analisados diversos transitórios elétricos envolvendo os transformadores de potência no sentido de distinguir os diferentes tipos de faltas internas da corrente de magnetização (*inrush*). A metodologia foi validada por meio de um sistema teste implementado no software EMTP/ATP. A partir disso foram adquiridos dados de simulação considerando diversas condições operacionais do transformador de potência. A metodologia desenvolvida monitora e analisa os Coeficientes de Detalhes (CD) para diferentes níveis de decomposição pela Transformada Wavelet Discreta da corrente diferencial. O método extrai as características e calcula a variação dos níveis dos CD para a classificação dos transitórios. Os resultados mostraram que, durante as condições de faltas internas, os CD apresentam valores de pico elevados e constantes, diferente do que acontece em outros transitórios. A metodologia proposta neste trabalho é capaz de identificar e discriminar corretamente as condições de falta interna de outros transitórios. Essa propriedade torna o método proposto promissor para fins de proteção de transformadores de potência.

Palavras-chave: Proteção de transformadores de potência, Proteção diferencial, Correntes de *Inrush*, Falta Interna, Transformada Wavelet Discreta.

## ABSTRACT

# METHODOLOGY FOR DETECTION AND CLASSIFICATION OF FAULT IN POWER TRANSFORMERS BY DISCRETE WAVELET TRANSFORM

AUTHOR: JEFERSON PRATES MARQUES

COORDINATOR: GHENDY CARDOSO JUNIOR, Dr. Eng.

This thesis presents the development of a methodology for the detection and classification of electrical transients in power transformers, for protection purposes. For this, we analyzed several electrical transients involving the power transformers, in order to distinguish the different types of internal faults of the inrush current. The methodology was validated through a test system implemented in the ATP/EMTP software. From this, simulation data were acquired considering several operating conditions of the power transformer. The developed methodology monitors and analyzes the Detail Coefficients (CD) for different levels of decomposition by the Discrete Wavelet Transform of the differential current. The method extracts the characteristics and calculates the variation of the CD levels for the classification of transients. The results showed that during the internal fault conditions the CD presents high and constant peak values, different from what happens in other transients. The methodology proposed in this work is able to identify and correctly discriminate the internal fault conditions of other transients. This property makes the proposed method promising for power transformer protection purposes.

**Keywords:** Power transformer protection, Differential protection, *Inrush* currents, Internal fault, Discrete Wavelet Transform.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Proteção diferencial para transformadores.....	21
Figura 2 - Curva características de operação da proteção diferencial percentual. ....	23
Figura 3 - Forma de onda típica da corrente de <i>inrush</i> . ....	26
Figura 4 - Forma de onda de corrente um transformador sobreexcitado. ....	29
Figura 5 - Forma de onda de corrente primária e secundária de um TC saturado.....	30
Figura 6 - Energização de transformadores em paralelo.....	31
Figura 7 - Exemplos de funções wavelets. ....	34
Figura 8 - Dilatação de wavelets. ....	36
Figura 9 - Translação de wavelets. ....	36
Figura 10 - Decomposição de um sinal utilizando TWD.....	38
Figura 11 - Comportamento dos coeficientes de detalhes do 1º e 3º nível de decomposição da TWD durante condição de falta interna em 10% das espiras da fase A no lado de alta tensão. ....	48
Figura 12 - Comportamento dos coeficientes de detalhes do 1º e 3º nível de decomposição da TWD durante condição de <i>inrush</i> . ....	48
Figura 13 - Fluxograma da metodologia proposta.....	49
Figura 14 - Janela de dados para análise das amostras dos CD.....	52
Figura 15 - Análise da variação dos CD de 1º e 3º nível durante a condição de falta interna. ....	54
Figura 16 - Análise da variação dos CD de 1º e 3º nível durante a condição de correntes de <i>inrush</i> . ....	54
Figura 17 - Sistema elétrico analisado. ....	57
Figura 18 - Modelo do transformador ( <i>saturable</i> ) monofásico utilizado no ATP. ....	58
Figura 19 - Detalhes da conexões dos enrolamentos para o transformador trifásico. ....	59
Figura 20 - Curva de saturação do transformador de potência.....	59
Figura 21 - Divisão em percentagem dos enrolamentos primário ( $\Delta$ ) e secundário (Y). ....	60
Figura 22 - Esquema de conexão dos TCs. ....	62
Figura 23 - Curva de saturação dos transformadores de corrente. ....	62
Figura 24 - Correntes diferenciais durante a condição de energização do transformador, ângulo de incidência de 0º.....	67

*Capítulo 1 – Introdução*

---

Figura 25 - Variação dos CD do 1º e 3º nível de decomposição para uma condição de <i>inrush</i> , e sinal de decisão do método.	68
Figura 26 - Correntes diferenciais durante a condição de energização com falta interna em 10% dos enrolamentos da fase A-T do primário, ângulo de 60º.	69
Figura 27 - Variação dos CD do 1º e 3º nível de decomposição para a condição de energização com falta interna em 10% dos enrolamento da fase A do primário, e sinal de decisão do método.	70
Figura 28 - Correntes diferenciais para condição de falta interna em 5% dos enrolamentos da fase A-T do primário, ângulo de incidência de 90º.	71
Figura 29 - Variação dos CD do 1º e 3º nível de decomposição para a condição de falta interna em 5% dos enrolamento da fase A do primário, e sinal de decisão do método.	72
Figura 30 - Correntes diferenciais para condição de energização com falta interna entre 5% e 10% dos enrolamentos da fase A do secundário, ângulo de incidência de 0º.	73
Figura 31 - Variação dos CD do 1º e 3º nível de decomposição para a condição de energização com falta interna entre 5% e 10% dos enrolamento da fase A do secundário, e sinal de decisão do método.	74
Figura 32 - Circuito de simulação da energização solidária.	75
Figura 33 - Correntes diferenciais do TR <sub>1</sub> durante a condição de energização solidária.	75
Figura 34 - Variação dos CD do 1º e 3º nível de decomposição para a condição de energização solidária, e sinal de decisão do método.	76
Figura 35 - Correntes diferenciais para condição de falta externa próximo ao TC secundário nas fases ABC.	77
Figura 36 - Variação dos CD do 1º e 3º nível de decomposição para a condição de falta externa próximo ao TC secundário, e sinal de decisão do método.	78
Figura 37 - Correntes diferenciais para condição de sobre-excitação de 120%.	79
Figura 38 - Variação dos CD do 1º e 3º nível de decomposição para a condição de sobreexcitação de 120%, e sinal de decisão do método.	80
Figura 39 - Correntes diferenciais durante a condição de energização com discordância de fases.	81
Figura 40 - Variação dos CD do 1º e 3º nível de decomposição para a condição de energização com discordância de fases, e sinal de decisão do método.	82
Figura 41 - Limiar adaptativo do método de Oliveira et al(2014).	84

# SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	16
1.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS .....	16
1.2	OBJETIVOS DO TRABALHO .....	17
1.3	MOTIVAÇÃO .....	17
1.4	CONTRIBUIÇÕES DA TESE .....	18
1.5	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....	19
2	PROTEÇÃO DE TRANSFORMADORES .....	20
2.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS .....	20
2.2	PROTEÇÃO DIFERENCIAL .....	20
2.3	RELÉ DIFERENCIAL PERCENTUAL .....	21
2.4	PROTEÇÃO DIFERENCIAL PERCENTUAL COM RESTRIÇÃO POR HARMÔNICOS .....	23
2.5	TRANSITÓRIOS EM TRANSFORMADORES .....	25
2.5.1	Corrente de magnetização - <i>inrush</i> .....	25
2.5.2	Sobreexcitação do transformador .....	28
2.5.3	Saturação dos Transformadores de Corrente (TC) .....	29
2.5.4	Energização solidária ( <i>sympathetic inrush</i> ) .....	30
2.5.5	Remoção de faltas próximas ao transformador .....	31
2.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	32
3	CONCEITOS SOBRE TRANSFORMADA WAVELET .....	33
3.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS .....	33
3.2	FUNDAMENTOS DA TRANSFORMADA WAVELET .....	33
3.2.1	Transformada Wavelet Contínua .....	35
3.2.2	Transformada Wavelet Discreta .....	36
3.3	TRANSFORMADA WAVELET DISCRETA POR BANCO DE FILTROS .....	37
3.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	39
4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	40
4.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	46
5	METODOLOGIA PROPOSTA .....	47
5.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS .....	47
5.2	DESENVOLVIMENTO DA METODOLOGIA .....	47

5.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	55
6	SISTEMA TESTE E FENÔMENOS A SEREM ESTUDADOS .....	56
6.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS .....	56
6.2	SISTEMA TESTE.....	56
6.2.1	Fonte equivalente.....	57
6.2.2	O transformador de potência .....	58
6.2.3	Os transformadores de corrente.....	61
6.2.4	A linha de transmissão .....	63
6.2.5	A carga .....	63
6.3	FENÔMENOS ESTUDADOS .....	64
6.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	65
7	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	66
7.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS .....	66
7.2	ENERGIZAÇÃO DO TRANSFORMADOR ( <i>INRUSH</i> ) .....	66
7.3	CONDIÇÕES DE FALTAS INTERNAS NO TRANSFORMADOR .....	68
7.3.1	Energização com falta interna .....	68
7.3.2	Falta interna.....	70
7.3.3	Falta interna entre espiras (turn-to-turn).....	72
7.4	ENERGIZAÇÃO SOLIDÁRIA (“ <i>SYMPATHETIC INRUSH</i> ”).....	74
7.5	FALTA EXTERNA .....	76
7.6	SOBREEXCITAÇÃO .....	78
7.7	OUTROS DISTÚRBIOS.....	80
7.7.1	Erro na relação de transformação dos tcs.....	80
7.7.2	Energização com discordância de fases.....	81
7.8	COMPARAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA COM MÉTODOS PRESENTES NO ESTADO DA ARTE.....	82
7.8.1	Análise de tempo dos métodos .....	84
7.8.2	Comparativo da confiabilidade dos métodos .....	87
7.9	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	88
8	CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS .....	89
8.1	CONCLUSÕES .....	89
8.2	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS .....	90
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	91

## APÊNDICES

A - DIVULGAÇÃO DO TRABALHO.....	94
B - EXEMPLO DE CARD DE SIMULAÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO.....	95
C - DADOS DAS CURVAS DE SATURAÇÃO.....	99

## **1 INTRODUÇÃO**

### **1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS**

Os transformadores de potência são equipamentos extremamente importantes para o funcionamento do SEP. Esses equipamentos, como os demais, estão sujeitos a diversas condições de operações e perturbações decorrentes de surtos e transitórios que podem acarretar prejuízos e transtornos aos agentes do setor. Devido a sua importância e alto valor financeiro, os transformadores necessitam de um sistema de proteção seguro, confiável e rápido para evitar danos ao equipamento e ao SEP. Vários métodos já foram desenvolvidos e estão em constante avaliação para garantir uma operação normal e segura do transformador (BARBOSA, 2010).

Apesar de diversas técnicas terem sido propostas para esta função de proteção, a filosofia mais aplicada e aprimorada ainda faz uso do princípio de conexão diferencial. A proteção diferencial (ANSI 87) é a principal técnica utilizada para proteção de transformadores de potência acima de 10 MVA. No entanto, tal sistema de proteção pode apresentar algumas limitações quando surgem condições transitórias como as correntes de *inrush*, sobreexcitação, saturação dos TC's e a condição de energização solidária (*sympathetic inrush*). Quando submetido a estas condições, surge um desbalanceamento entre as correntes primárias e secundárias do transformador, o que pode implicar em atuação indevida do relé de proteção diferencial (KASZTENNY et al., 1997).

Com o intuito de aprimorar e evitar a atuação indevida durante condições transitórias que não são curtos-circuitos, a proteção diferencial utiliza, por exemplo, a restrição com base na segunda e quinta harmônicas (HOROWITZ; PHADKE, 1996). Cabe salientar que determinadas condições de faltas internas também podem conter componentes de segunda harmônica, o que poderia acarretar falha de operação do relé diferencial (PIHLER et al., 1997).

Nesse contexto, nos últimos anos diversos trabalhos têm sido propostos buscando melhorar o sistema de proteção de transformadores de potência, cada qual utilizando diferentes técnicas matemáticas como Redes Neurais Artificiais (RNA), Morfologia Matemática, Transformada Wavelet, etc, sendo o principal foco a distinção entre as condições de correntes de *inrush* e faltas internas.

Diante disso, esta pesquisa propõe uma metodologia para detecção de transitórios em transformadores de potência, classificando a condição de operação como *inrush*/transitório externo ou falta interna. Para alcançar esse objetivo, a metodologia faz uso dos Coeficientes de Detalhes (CD) provenientes da Transformada Wavelet Discreta (TWD) e, por meio de uma simples comparação entre os CD permite a classificação do transitório sem fazer uso de um limiar de atuação.

## 1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

Este trabalho de tese tem como objetivo geral o desenvolvimento de uma metodologia para a detecção e classificação de transitórios em transformadores de força.

Os objetivos específicos são:

- Processar os sinais de corrente, no tempo, por meio da Transformada Wavelet Discreta;
- Classificar os transitórios elétricos em dois grupos: *inrush*/falta externa ou falta interna;
- Não fazer uso de limiares para ajuste ("*setting-free*");

## 1.3 MOTIVAÇÃO

Garantir o fornecimento de energia elétrica para seus consumidores é de grande importância para o desenvolvimento de um país. A indústria, principal consumidor de energia elétrica no Brasil, representando 40% do consumo de energia elétrica, necessita que seja atendida a sua demanda para garantir seu funcionamento e crescimento.

Atualmente, as funções de monitoramento e diagnóstico do estado de operação dos sistemas de proteção e equipamentos elétricos favorecem a redução dos desligamentos programados e não programados.

Conforme descrito anteriormente, a metodologia de proteção mais utilizada atualmente para a proteção de transformadores é a que utiliza a restrição de 2ª harmônica. Essa pode apresentar imprecisões que podem comprometer a correta identificação e distinção das situações de transitórios ocorridos durante a energização dos transformadores, conhecidas

como correntes de *inrush*. Desse modo, o desenvolvimento de metodologias confiáveis para análise e correta identificação de distúrbios elétricos em transformadores de potência faz-se necessário.

Nos últimos anos diversas técnicas têm sido propostas no sentido de melhorar o desempenho da proteção diferencial. A maioria dessas são complexas e pouco robustas, o que dificulta a sua aplicação prática. A partir disto, o desenvolvimento de uma metodologia que supra tais requisitos torna-se um desafio.

Diante deste contexto, o desenvolvimento de uma metodologia simples, eficiente e robusta que garanta a correta identificação e discriminação dos transitórios nos quais os transformadores de potência estão sujeitos é justificada e alvo de muitos estudos.

#### **1.4 CONTRIBUIÇÕES DA TESE**

Diversos trabalhos e pesquisas utilizando diferentes técnicas e metodologias matemáticas tem sido realizados no sentido de distinguir, principalmente, as condições de correntes de magnetização (*inrush*) de faltas internas em transformadores de potência. No entanto, muitas das propostas encontradas no estado da arte ou são complexas, o que dificulta a sua implementação real, ou necessitam de um ou mais ajustes (limiares) para identificação dos transitórios. Desta forma, este trabalho propõe uma metodologia de proteção que visa trazer as seguintes contribuições:

- Método para detecção e classificação dos transitórios eletromagnéticos em transformadores, que não faz uso de limiar de atuação;
- Método que identifique de forma rápida as condições de faltas internas;
- Disponibilidade e segurança durante transitórios eletromagnéticos, tais como correntes de *inrush*, sobreexcitação, energização solidária, etc;
- Implementação simples, que viabilize sua aplicação real.

## **1.5 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO**

O Capítulo 2 aborda a proteção diferencial de transformadores, mostrando seus conceitos de funcionamento e características de operação, assim como os principais transitórios que afetam o funcionamento dos transformadores de potência.

Já no Capítulo 3 os conceitos sobre a Transformada Wavelet são apresentados, trazendo uma breve descrição das suas funções, como a wavelet contínua e discreta e a sua implementação através de banco de filtros.

No Capítulo 4 deste trabalho é apresentado um resumo dos principais trabalhos publicados e presentes no estado da arte no que diz respeito à proteção de transformadores de potência.

A metodologia proposta neste trabalho é apresentada no Capítulo 6. Os detalhes do seu desenvolvimento, as características analisadas e seu funcionamento são debatidos passo-a-passo.

O Capítulo 5 apresenta o sistema elétrico estudado neste trabalho, a partir do qual foram realizadas as simulações para aquisição de dados dos transitórios. Neste capítulo ainda, são apresentados os fenômenos estudados que serviram para teste da metodologia.

No Capítulo 7 são apresentados os resultados obtidos pela metodologia proposta quando da análise dos transitórios testados. Ainda neste capítulo, são apresentadas análises comparativas com outros métodos presentes no estado da arte.

O Capítulo 8 é destinado às conclusões e sugestões de trabalhos futuros.

## **2 PROTEÇÃO DE TRANSFORMADORES**

### **2.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS**

Neste capítulo serão abordados os conceitos relacionados a proteção diferencial de transformadores de potência, o princípio de funcionamento do relé diferencial percentual e os principais fenômenos transitórios que ocorrem do SEP e que podem afetar o funcionamento do sistema de proteção dos transformadores de potência.

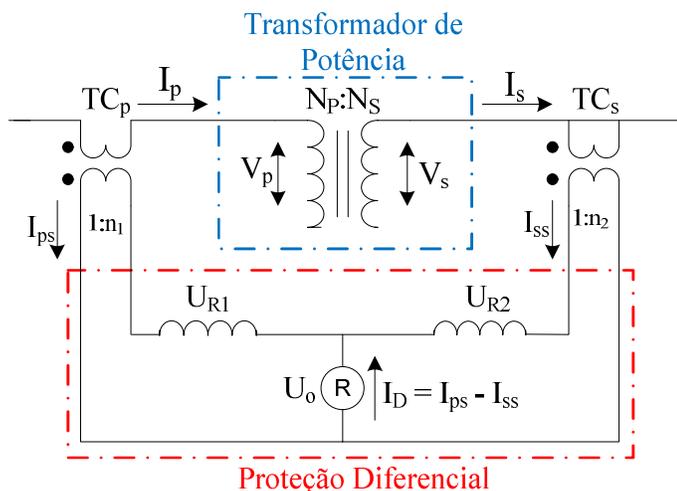
### **2.2 PROTEÇÃO DIFERENCIAL**

Não existe uma forma padronizada para proteção de todos os transformadores, ou mesmo transformadores idênticos que cumprem funções diferentes. Muitas instalações requerem uma análise individual de engenharia para determinar o melhor esquema e custo benefício (IEEE Std C37.91-2005).

Atualmente a proteção diferencial (ANSI 87) é a filosofia de proteção comumente utilizada em transformadores de potência a partir de 10 MVA, além de barramentos, grandes motores, geradores, entre outros (HOROWITZ; PHADKE, 2008).

O princípio de funcionamento da filosofia baseia-se na diferença fasorial entre as correntes do primário e secundário que fluem pelo transformador de potência. A Figura 1 ilustra o esquema simplificado da proteção diferencial e dos Transformadores de Corrente (TC's) conectados em série com o ramo primário e secundário a ser protegido. No esquema apresentado, a zona de proteção é definida como a região abrangida pelos TC's em ambos os lados do transformador a ser protegido. O papel dos TC's na proteção diferencial é de transformar as correntes do SEP para valores de baixa amplitude e também fornecer isolamento galvânico entre a rede elétrica e os relés de proteção. Na Figura 1,  $N_p:N_s$  é a relação de transformação entre o primário e o secundário do transformador protegido,  $1:n_1$  e  $1:n_2$  são as relações de transformação do TC primário e secundário, respectivamente. As unidades de restrição são representadas por  $U_{R1}$  e  $U_{R2}$ ,  $U_o$  é a unidade de operação do relé diferencial e  $V_p$  e  $V_s$  são as tensões primária e secundária do transformador.

Figura 1 - Proteção diferencial para transformadores.



Fonte: Adaptado de (BARBOSA, 2010).

A corrente diferencial é obtida por meio da diferença fasorial entre as correntes secundárias dos TCs primário e secundário,  $I_{ps}$  e  $I_{ss}$ , respectivamente, como mostra a equação (1) (HARLOW, 2007).

$$I_D = |\vec{I}_{ps} - \vec{I}_{ss}| \quad (1)$$

Em condição de funcionamento ideal do transformador, as correntes do secundário dos TCs são iguais ( $I_{ps} = I_{ss}$ ), o que resulta em uma corrente diferencial igual a zero. No entanto, em condições de falta interna no transformador, ocorre o surgimento de correntes com magnitudes distintas entre  $I_{ps}$  e  $I_{ss}$ , o que resulta em uma corrente diferencial diferente de zero ( $I_D \neq 0$ ) ocasionando a atuação do relé diferencial de proteção.

### 2.3 RELÉ DIFERENCIAL PERCENTUAL

O relé diferencial percentual possui essencialmente a mesma filosofia de proteção do relé diferencial apresentada anteriormente, porém consegue acomodar erros que por ventura possam surgir nas correntes primária e secundária dos transformadores de potência, já que fazem uso de uma relação entre a corrente diferencial e a de restrição (ANDERSON, 1999).

Conforme apresentado na Figura 1, as correntes que percorrem as unidades de restrição ( $U_{R1}$  e  $U_{R2}$ ) são denominadas de correntes de restrição ( $I_R$ ), e a corrente de percorre

## Capítulo 2 – Proteção de Transformadores

pela unidade de operação ( $U_O$ ) é denominada de corrente de operação ( $I_{OP}$ ). A partir da comparação entre  $I_R$  e  $I_{OP}$ , é realizada a tomada de decisão do relé diferencial percentual entre ativar ou restringir a atuação do relé de proteção.

A corrente de restrição pode ser determinada de diferentes formas, como mostram as equações (2) a (4).

$$I_R = \text{Max}(|\vec{I}_{ps}|, |\vec{I}_{ss}|) \quad (2)$$

$$I_R = k |\vec{I}_{ps} - \vec{I}_{ss}| \quad (3)$$

$$I_R = k (|\vec{I}_{ps}| + |\vec{I}_{ss}|) \quad (4)$$

A corrente de operação (também chamada de corrente diferencial) é dada por:

$$I_{OP} = |\vec{I}_{ps} - \vec{I}_{ss}| \quad (5)$$

Sendo  $I_{ps}$  e  $I_{ss}$  as correntes secundárias dos TC's primário e secundário do transformador de potência, respectivamente. Nas equações acima,  $k$  representa a inclinação característica percentual diferencial do relé de proteção, e normalmente seu valor varia entre 0 e 1 e é representado em valores percentuais. Um relé com uma ajuste de  $k = 10\%$  apresenta uma sensibilidade maior do que um relé com um ajuste de  $k = 40\%$ , por exemplo. Estes ajustes da restrição percentual tornam-se necessárias para considerar as correntes diferenciais provenientes de erros na relação de transformação dos TC's e mudanças de *tap* (BARBOSA, 2010).

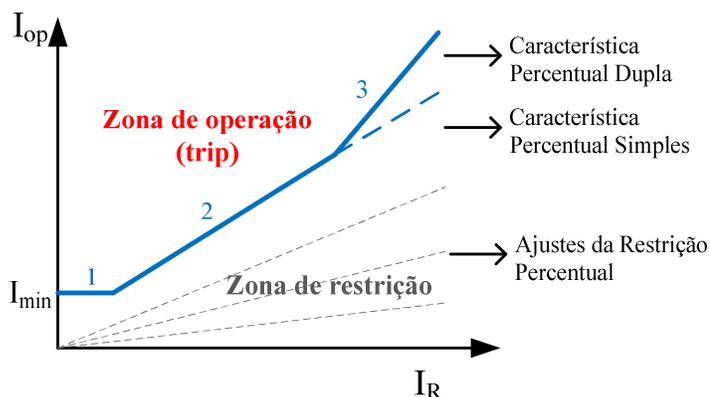
O relé diferencial percentual irá atuar quando a corrente diferencial ( $I_D$ ) satisfizer a relações dada a seguir:

$$I_D \geq k * I_R \quad (6)$$

A Figura 2 apresenta a curva característica de operação do relé diferencial percentual, incluindo as suas zonas de operação e restrição. A curva de operação consiste de uma reta horizontal definindo o limiar mínimo ou *pickup* de corrente ( $I_{\min}$ ), e uma linha inclinada que representa a característica percentual. A região acima da curva característica representa a região de operação e abaixo a região de restrição (HARLOW, 2007). Uma prática comumente utilizada nos relés diferenciais é o emprego de duas inclinações distintas, sendo a primeira, região 2, mais sensível e utilizada para baixas correntes de carregamento. A segunda inclinação, região 3, é menos sensível e destinada para maiores erros de TC's devido às altas

correntes de carga e possíveis saturações em condições de faltas externas (GUZMÁN et al., 2001).

Figura 2 - Curva características de operação da proteção diferencial percentual.



Fonte: Adaptado de (HARLOW, 2007).

Um fato importante de se salientar é que o desempenho dos relés diferenciais está ligado às correntes secundárias dos TC's, uma vez que são estas formas de ondas que os dispositivos utilizam para a tomada de decisão. Deste modo, quando um TC satura, ou se ambos os TC's saturam em níveis diferentes, falsas correntes de operação aparecem no relé diferencial e podem causar a sua má operação (BARBOSA, 2010).

## 2.4 PROTEÇÃO DIFERENCIAL PERCENTUAL COM RESTRIÇÃO POR HARMÔNICOS

Conforme mencionado anteriormente, o relé de proteção diferencial está sujeito as correntes que podem ocasionar em uma operação indevida. Não só a condição de saturação dos TC's podem ocasionar má operação do relé, outras fontes de erro podem ser citadas (HARLOW, 2007):

- Variação da relação de transformação do transformador de potência devido a mudança de *tap*;
- Correntes de magnetização criadas pelos transitórios devidos à energização;
- Altas correntes de excitação causadas pela sobreexcitação do transformador;

*Capítulo 2 – Proteção de Transformadores*

---

- Rejeição de cargas;
- Correntes de magnetização criadas pelos transitórios devido a energização solidária (*sympathetic inrush*).

Segundo Harlow (2007), o relé diferencial com característica percentual com restrição harmônica soluciona os problemas eficientemente. No entanto, a discriminação entre as correntes de falta e correntes de energização, sobreexcitação e energização solidária configuram o problema mais complexo a ser analisado e avaliado. Alguns trabalhos, tais como Einvall e Linders (1975), Gunzmán et al. (2002) e Behrend, Fischer e Labuschagne (2011) tem avaliado a predominância de componentes harmônicas durante os distúrbios em que os transformadores de potência estão sujeitos, conforme mostra a Tabela 1.

Tabela 1 - Predominância de componentes harmônicas nos distúrbios em transformadores.

<b>Distúrbios</b>	<b>Fundamental</b>	<b>2<sup>a</sup></b>	<b>3<sup>a</sup></b>	<b>5<sup>a</sup></b>
Correntes de inrush	√	√	-	-
Sobreexcitação	√	-	√	√
Falta interna	√	-	-	-
Falta externa com saturação dos TCs	√	-	√	-

Os relés diferenciais com restrição percentual e por harmônica utilizam, além da restrição percentual, as harmônicas presentes na corrente de magnetização dos transformadores durante sua energização. O objetivo é bloquear a sua operação ou elevar o valor da corrente de acionamento, tornando viável o ajuste de corrente de baixo valor e tempos de retardo reduzidos, sem o inconveniente de uma operação indesejada (MAMEDE FILHO, 2013). Ainda segundo Mamede Filho (2013), a restrição por 2<sup>a</sup> harmônica inibe a atuação do disjuntor durante a energização do transformador. Já a restrição das 3<sup>a</sup> e 5<sup>a</sup> harmônicas é empregado para inibir o disparo do disjuntor durante um processo de sobreexcitação do transformador, como, por exemplo, quando o transformador está submetido a uma carga de elevado efeito capacitivo (MAMEDE FILHO, 2013).

Os relés diferenciais com a função de restrição por harmônicos englobam a função diferencial percentual criando uma corrente de restrição adicional com base no conteúdo

harmônico selecionado das correntes de entrada. A equação (7) mostra como a corrente de restrição é calculada (MEDEIROS, 2014):

$$i_{Rest} = k * i_R + (K_2 i_{h2} + K_3 i_{h3} + \dots + K_h i_{hn}) \quad (7)$$

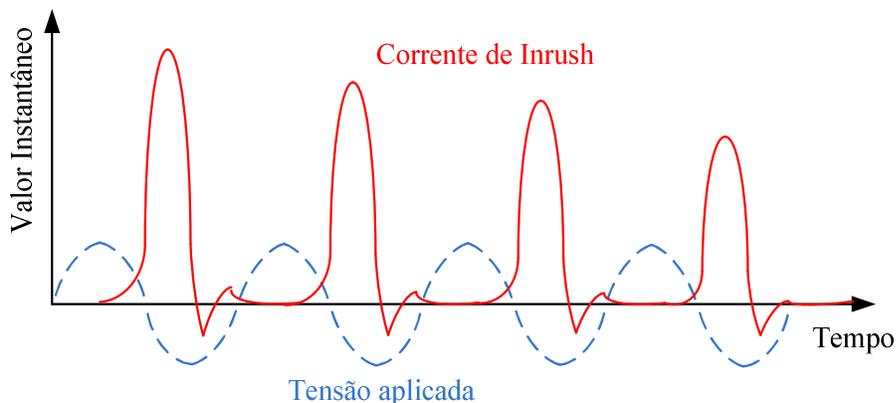
Sendo  $K_h$  uma constante para cada componente harmônica ( $h > 1$ ),  $i_{hn}$  a corrente com conteúdo harmônico de ordem  $n$  ( $n > 2$ ) em relação à corrente fundamental.

A constante  $K_h$  corresponde ao inverso do valor percentual da componente harmônica  $h$  em relação à componente fundamental. Por exemplo, utilizar um ajuste de 10% para a restrição de 2ª harmônica, representa que 10 vezes a componente de 2ª harmônica será acrescentada à corrente de restrição. Já um ajuste de 20% representa que 5 vezes a componente de 2ª harmônica será adicionada na corrente de restrição. Deste modo, quanto menor o ajuste da porcentagem maior será o efeito da restrição (BEHRENDT, FISCHER, LABUSCHAGNE, 2011).

## 2.5 TRANSITÓRIOS EM TRANSFORMADORES

### 2.5.1 Corrente de magnetização - *inrush*

A corrente de *inrush* é um fenômeno que surge devido à magnetização e saturação do núcleo do transformador de potência durante a sua energização. A corrente de magnetização ocorre no transformador quando a polaridade e a amplitude do fluxo residual não coincidem com a polaridade e amplitude do valor instantâneo do fluxo de estado permanente durante o instante de energização (BARBOSA, 2010). A Figura 3 ilustra a forma de onda típica da corrente de *inrush* em um transformador.

Figura 3 - Forma de onda típica da corrente de *inrush*.

Fonte: Adaptado de (ALENCAR, 2013).

Quando um transformador de potência é desenergizado, uma quantidade de fluxo residual permanece no núcleo devido às características magnéticas do material que o constitui, que pode chegar na faixa de 50% a 90% do fluxo de operação normal. No momento em que o transformador é novamente energizado, o fluxo produzido pela fonte de tensão sobrepõe-se ao fluxo remanescente no núcleo. Para manter o nível de fluxo existente, o transformador solicita uma corrente que poderá ser superior ao nível de corrente de plena carga, ocasionando a saturação do núcleo e produzindo a corrente de *inrush* (ALENCAR, 2013).

O efeito transitório do *inrush* pode durar alguns segundos até o sistema alcançar a condição de regime permanente e ainda atingir de 10 a 20 vezes a corrente nominal do transformador. As correntes de *inrush* apresentam uma alta componente DC (corrente contínua) e tem uma presença significativa de componente harmônica de 2ª ordem, o que afeta a qualidade de energia fornecida pelo transformador.

O sistema de proteção diferencial deve ter a capacidade de distinguir as correntes de energização das faltas internas. Para isso, alguns métodos são utilizados para evitar desligamentos indevidos do equipamento, tais como: temporização do relé diferencial (time delay), diminuição da sensibilidade do relé diferencial durante a energização e restrição de harmônicos (ANDERSON, 1999).

Entre os fatores que influenciam na amplitude, a forma e a duração da corrente de *inrush* estão (KULKARNI, KHAPARDE, 2005; BARBOSA, 2010):

**a) Ângulo de chaveamento ( $\alpha$ )**

A amplitude da corrente de magnetização é proporcional ao ângulo de chaveamento do transformador, assim a corrente será máxima quando o transformador for ligado no ponto de tensão zero ( $\alpha = 0^\circ$ ), e será mínima quando ligado no ponto de tensão máxima ( $\alpha = 90^\circ$ ).

**b) Densidade do fluxo residual**

O fluxo residual presente no transformador depende das características do material do seu núcleo e do fator de potência da carga no momento que foi desconectado do sistema elétrico. Verifica-se que, quanto maior for o fluxo residual, maior será a corrente de energização, principalmente se o fluxo residual possuir a mesma polaridade do fluxo principal.

**c) Nível de tensão da rede**

Quanto maior for o nível de tensão de alimentação do transformador de potência, maior será o fluxo e, conseqüentemente, a corrente de magnetização, pois o fluxo ( $\phi$ ) é diretamente proporcional a tensão máxima.

**d) Resistência série**

A resistência do sistema em que o transformador está conectado tem um efeito predominante na corrente de energização devido ao amortecimento fornecido, o que proporciona uma redução na amplitude da corrente inicial de magnetização. Esta característica explica, por exemplo, porque os transformadores conectados próximos às fontes geradoras possuem uma corrente de energização com amplitude maior e tempo de amortecimento mais lento.

**e) Nível de saturação do núcleo**

É importante salientar que a corrente de energização inicial ( $i_0$ ) é diretamente proporcional ao fluxo que circula fora do núcleo magnético, por exemplo, pelo ar ( $\phi_{ar}$ ). Deste modo, quanto mais saturado estiver o ferro presente no núcleo do transformador, maior será a proporção do fluxo total que se fechará através do ar, tornando a corrente de energização mais proeminente.

**f) Energização sob carga**

Se o transformador for conectado com carga, os picos da corrente de magnetização serão afetados até certo ponto pelo fator de potência da carga. Quando o transformador é energizado com uma elevada corrente de carga e fator de potência próximo ao unitário, o pico de corrente tende a ser menor, mas se o fator de potência for baixo, o pico de corrente será maior.

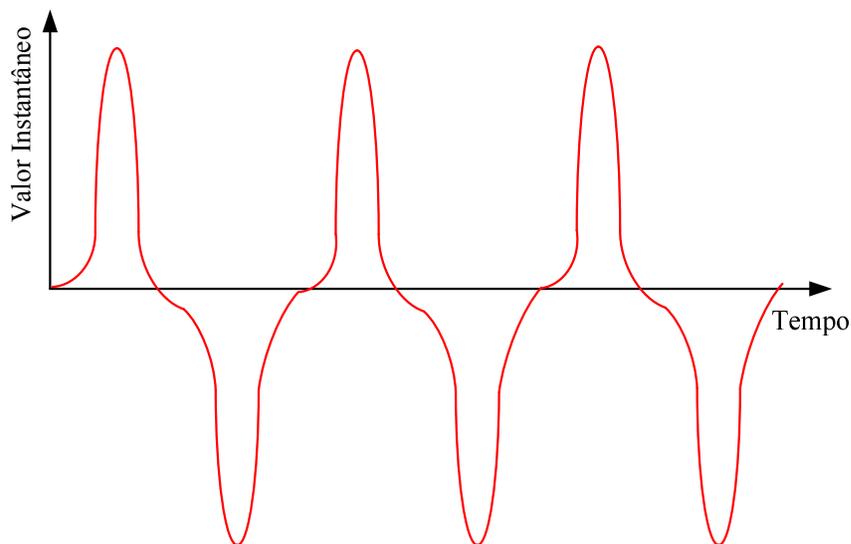
**2.5.2 Sobreexcitação do transformador**

O fluxo de magnetização no núcleo do transformador é diretamente proporcional à tensão aplicada e inversamente proporcional à frequência do sistema. Quando os transformadores são submetidos a condições de sobretensões e sub-frequências acima dos limites permitidos pelo equipamento, o núcleo satura, surge um aquecimento excessivo, ruído, aumento da corrente de magnetização e vibração que pode acarretar em danos ao transformador (HARLOW, 2007).

Devido ao comportamento não linear das correntes provocado pela saturação do núcleo durante a condição de sobreexcitação, há o surgimento de distorções harmônicas de 3ª e 5ª ordem, o que implica em um aumento na corrente de magnetização e conseqüentemente na corrente diferencial (ANDERSON, 1999; BLACKBURN, 2007). Para a identificação da condição de sobreexcitação, a componente de 3ª harmônica é a mais adequada para a detecção dessa condição, mas devido a compensação delta ou conexão delta dos TC's, essa componente harmônica pode não estar presente. Logo, a componente de 5ª harmônica é mais adequada para a identificação desse fenômeno (HARLOW, 2007).

A Figura 4 ilustra a forma de onda típica da corrente durante a condição de sobreexcitação.

Figura 4 - Forma de onda de corrente um transformador sobreexcitado.



Fonte: Adaptado de (OLIVEIRA, 2013).

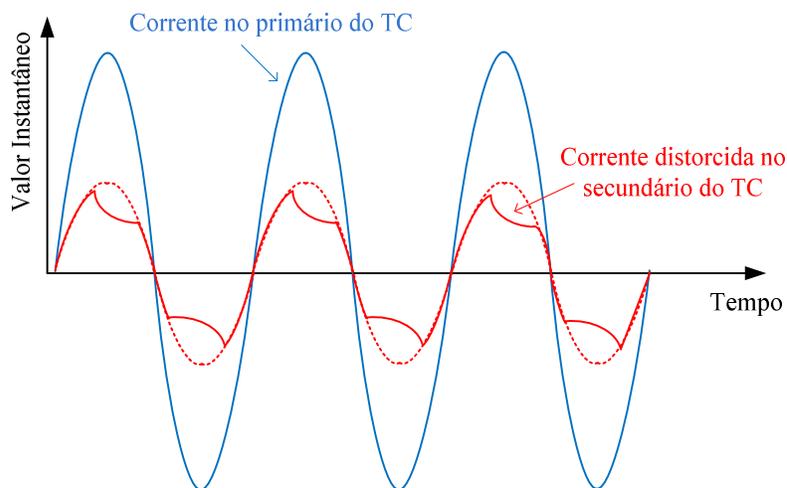
Uma alternativa para de proteção para os transformadores perante tais condições é a utilização de relés V/Hz, os quais respondem à variação de tensão em função da frequência (HARLOW, 2007).

### **2.5.3 Saturação dos Transformadores de Corrente (TC)**

Os transformadores de corrente tem um papel importante no esquema de proteção diferencial, pois são responsáveis pela transformação da corrente primária para níveis que possam ser medidos com segurança, além de fornecer um isolamento galvânico entre a rede de energia e o relé de proteção. Situações como faltas externas próximas aos TC's, podem fazer com que surjam correntes elevadas de até 50 vezes a corrente nominal (HOROWITZ e PHADKE, 1995). O TC próximo a ocorrência da falta poderá ser levado à condição de saturação, fazendo com que surja uma falsa corrente diferencial que poderá ser mal interpretada pelo sistema de proteção adotado, levando a uma operação equivocada do relé de proteção (SEGATTO, 2005). Para faltas internas, as harmônicas provenientes da saturação do TC podem atrasar a operação do relé diferencial, caso esse tenha restrição por harmônica ou até mesmo bloqueá-los (HARLOW, 2007).

Na Figura 5 é ilustrada uma forma de onda de corrente típica quando ocorre a saturação do TC.

Figura 5 - Forma de onda de corrente primária e secundária de um TC saturado.



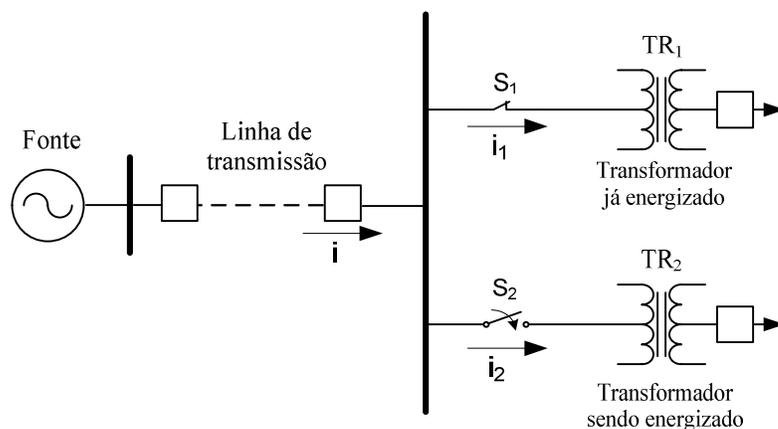
Fonte: Adaptado de (OLIVEIRA, 2013).

#### 2.5.4 Energização solidária (*sympathetic inrush*)

A energização de transformadores em paralelo, conhecida como energização solidária ou *sympathetic inrush*, faz com que surjam transitórios e sobretensões nos transformadores próximos, mesmo quando estes estejam em operação normal (KULKARNI e KHAPARDE, 2005).

A Figura 6 apresenta um circuito elétrico com dois transformadores conectados em paralelo. Considere que o transformador  $TR_1$  já está previamente energizado e operando normalmente, e o transformador  $TR_2$  está desconectado do sistema elétrico (desenergizado). No momento que a chave  $S_2$  é fechada, a corrente de energização do transformador  $TR_2$  flui para o  $TR_1$  e produz um fluxo CC que se sobrepõe ao fluxo CA normal de magnetização (BARBOSA, 2010). Essa condição de operação gera um aumento na densidade de fluxo e proporciona altas correntes de magnetização em  $TR_1$ , porém menor que a corrente de *inrush*.

Figura 6 - Energização de transformadores em paralelo.



Fonte: Adaptado de (OLIVEIRA, 2013).

É importante salientar que mesmo que a magnitude da corrente de energização solidária seja menor que a corrente de *inrush*, o sistema de proteção poderá ser afetado e uma operação indevida do relé diferencial poderá ocorrer (ALENCAR, 2013).

### 2.5.5 Remoção de faltas próximas ao transformador

Quando uma falta externa próxima ao transformador de potência é removida pelo sistema de proteção, ocorre uma condição de operação no núcleo do equipamento similar às encontradas em condições de energização, ocasionando o surgimento da corrente de magnetização. Porém, esta corrente proveniente da remoção da falta é caracterizada por uma menor amplitude, pois não há fluxo remanescente durante o processo (HOROWITZ, PHADKE, 1996).

Nessa manobra, a tensão aplicada nos enrolamentos do transformador passa de um valor de falta para um valor de pós-falta (após a remoção da falta), e o fluxo concatenado comporta-se proporcionalmente em função dessa variação de tensão do mesmo modo. Dependendo do instante de remoção da falta externa, há o surgimento de uma componente DC no fluxo concatenado e as correntes primárias apresentam um comportamento semelhante às observadas durante a condição de energização (COURY et al, 2007).

## **2.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Neste capítulo foi apresentada a filosofia da proteção diferencial normalmente utilizada na proteção de transformadores de potência. A proteção diferencial percentual com restrição por harmônicos é atualmente o método de proteção mais utilizado na proteção de transformadores devido a sua simplicidade e sensibilidade de operação. No entanto, o SEP está sujeito a transitórios que podem não ser corretamente identificados pelo método de proteção diferencial convencional, acarretando em atuação indevida da proteção. Dentre os transitórios apresentados no capítulo, as correntes de *inrush* mostram-se mais complexas para discriminar das condições de faltas internas devido ao alto pico na magnitude da corrente no instante de energização dos transformadores de potência. Outros transitórios, como os apresentados neste capítulo, também podem afetar o sistema de proteção, o que exige um certo nível de robustez por parte da metodologia de proteção aplicada.

### **3 CONCEITOS SOBRE TRANSFORMADA WAVELET**

#### **3.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS**

A Transformada Wavelet (TW) é uma ferramenta computacional bastante utilizada em diversas áreas de conhecimento, tais como: engenharia, física, matemática, computação gráfica e processamento digital de sinais. Na área da engenharia elétrica, a TW tem sido amplamente aplicada na análise de transitórios envolvendo o SEP, principalmente em tópicos como proteção e qualidade de energia. Deste modo, a utilização da TW mostra-se como uma alternativa para melhorar o método de proteção de transformadores, assim como resolver alguns problemas encontrados na análise de transitórios que afetam a proteção diferencial convencional, favorecendo o processamento e análise dos sinais envolvidos nos distúrbios eletromagnéticos presentes no SEP.

#### **3.2 FUNDAMENTOS DA TRANSFORMADA WAVELET**

O conceito básico de Transformada Wavelet é derivado da transformada de Haar, proposta em 1910. No entanto, somente nos anos 1980 que sua formulação matemática passou a existir. Nessa época destacam-se as contribuições apresentadas por Daubechies (1992), onde se iniciava o conceito de Transformada Wavelet Discreta (TWD), e o trabalho de Mallat (1989) onde desenvolveu-se o conceito de análise multiresolução.

No ano de 1982, o engenheiro francês Jean Morlet desenvolveu uma TW, onde o sinal é constituído por diferentes características no tempo e na frequência. Para se obter bons resultados (ou resolução) no tempo para transitórios de alta frequência, e boa resolução na frequência para componentes de baixa frequência, Morlet introduziu a ideia de que as wavelets são uma família de funções construídas a partir de dilatações e translações de uma função simples, conhecida como wavelet mãe (DEBNATH, 2002).

A definição matemática para as funções wavelets é dada por (DEBNATH, 2002):

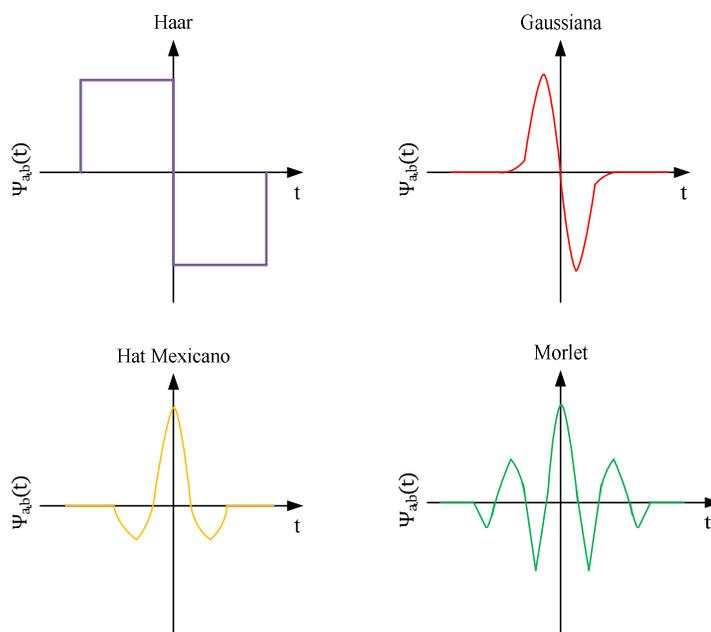
$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (8)$$

### Capítulo 3 – Conceitos sobre Transformada Wavelet

Sendo que:  $a$  é um número real conhecido como parâmetro de dimensionamento que determina o grau de compressão ou escala, e  $b$  é um número real que representa o coeficiente de translação que indica a localização temporal da wavelet. Quando  $|a| < 1$ , a wavelet está comprimida, ou seja, o suporte está menor no domínio do tempo que a wavelet mãe e corresponde principalmente a altas frequências. Quando  $|a| > 1$ , a função  $\psi_{a,b}(t)$  está dilatada com uma largura maior no tempo, o que corresponde a baixas frequências. O parâmetro  $b$  proporciona a varredura do sinal a ser analisado. Com isso, as wavelets se adaptam na largura do tempo para suas frequências, possibilitando que as análises dos sinais sejam realizadas no tempo e na frequência (BARBOSA, 2010).

A wavelet denomina uma família de funções simples por meio de operações de translação e dilatação. Existem várias wavelets que podem ser utilizadas para o processamento de sinais, sendo que, a escolha da melhor wavelet a ser aplicada depende tanto da natureza do sinal, quanto dos requisitos de análises que se pretende realizar (ADDISON, 2002). A Figura 7 ilustra alguns exemplos de wavelets mães.

Figura 7 - Exemplos de funções wavelets.



Fonte: Adaptado de (BARBOSA, 2010).

As funções wavelets devem satisfazer algumas condições matemáticas para que possam originar uma família de wavelets (ADDISON, 2002):

### Capítulo 3 – Conceitos sobre Transformada Wavelet

1. A wavelet tem que ser absolutamente integrável:

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

2. Devem possuir energia finita, a ser preservada pela análise:

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

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

3. A condição de admissibilidade deve ser respeitada:

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

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

4. As wavelets complexas não possuem componentes de frequência negativa.

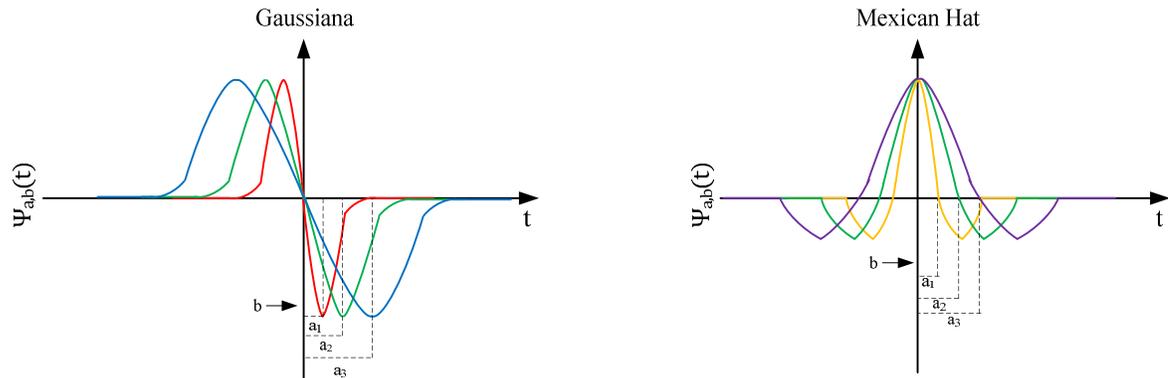
#### **3.2.1 Transformada Wavelet Contínua**

Matematicamente a TWC de um sinal  $f(t)$  em relação a uma wavelet mãe  $\Psi$  pode ser expressa como:

$$TWC(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (9)$$

Na equação (9) os parâmetros  $a$  e  $b$  variam continuamente no conjunto dos reais (R), e  $\psi_{a,b}$  é a wavelet mãe. A TWC depende de dois parâmetros,  $a$  e  $b$ , que correspondem, às informações de escala e tempo, ou dilatação e translação, respectivamente. Quando  $a > 1$  a wavelet mãe é dilatada. Quando  $a < 1$  a wavelet mãe tem o efeito de contração. Já para movimentar a wavelet mãe ao longo do sinal em análise (translação) é utilizado o parâmetro  $b$ . Na Figura 8 é ilustrado o procedimento de dilatação das funções wavelets Gaussiana e *Mexican Hat*.

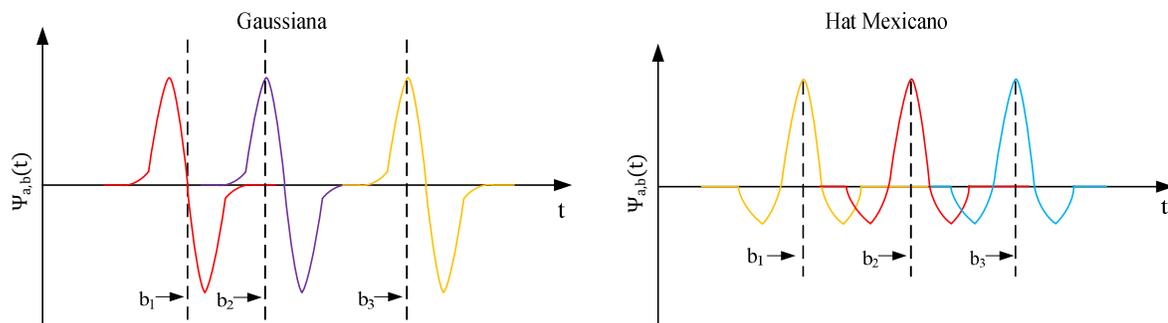
Figura 8 - Dilatação de wavelets.



Fonte: Adaptado de (BARBOSA, 2010).

Já na Figura 9 é apresentado um exemplo do processo de translação das funções wavelets Gaussiana e *Mexican Hat*.

Figura 9 - Translação de wavelets.



Fonte: Adaptado de (BARBOSA, 2010).

A TWC pode ser observada como uma correlação do sinal de entrada com um conjunto de wavelets com várias larguras (dilatadas ou contraídas) transladadas ao longo do sinal (BARBOSA, 2010).

### 3.2.2 Transformada Wavelet Discreta

Anteriormente a TW foi definida em parâmetros contínuos de escala ( $a$ ) e dilatação ( $b$ ). No entanto, para aplicações práticas, a discretização da TW torna-se mais eficiente e

permite sua implementação por meio de algoritmos numéricos (BARBOSA, 2010). A wavelet mãe  $\psi$  pode ser definida como (DEBNATH, 2002):

$$\psi_{m,n}(t) = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \psi\left(\frac{t-nb_0a_0^m}{a_0^m}\right) \quad (10)$$

Sendo  $m$  e  $n$ , os parâmetros inteiros de dilatação e translação, respectivamente, e  $a_0$  e  $b_0$ , as constantes de passo da dilatação e o parâmetro de localização, respectivamente. Assim, a TWD de um sinal contínuo  $x(t)$  pode ser definida como:

$$TWD(m, p) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi_{m,p} dt \quad (11)$$

A TWD de um sinal discreto  $x[n]$  pode ser expressa por (KIM, AGGARWAL, 2001):

$$TWD(m, k) = \frac{1}{\sqrt{a}} \sum_n x[n] \cdot g\left(\frac{k-nb_0a_0^m}{a_0^m}\right) \quad (12)$$

Onde a wavelet mãe é dada por:

$$g\left(\frac{k-nb_0a_0^m}{a_0^m}\right) \quad (13)$$

### 3.3 TRANSFORMADA WAVELET DISCRETA POR BANCO DE FILTROS

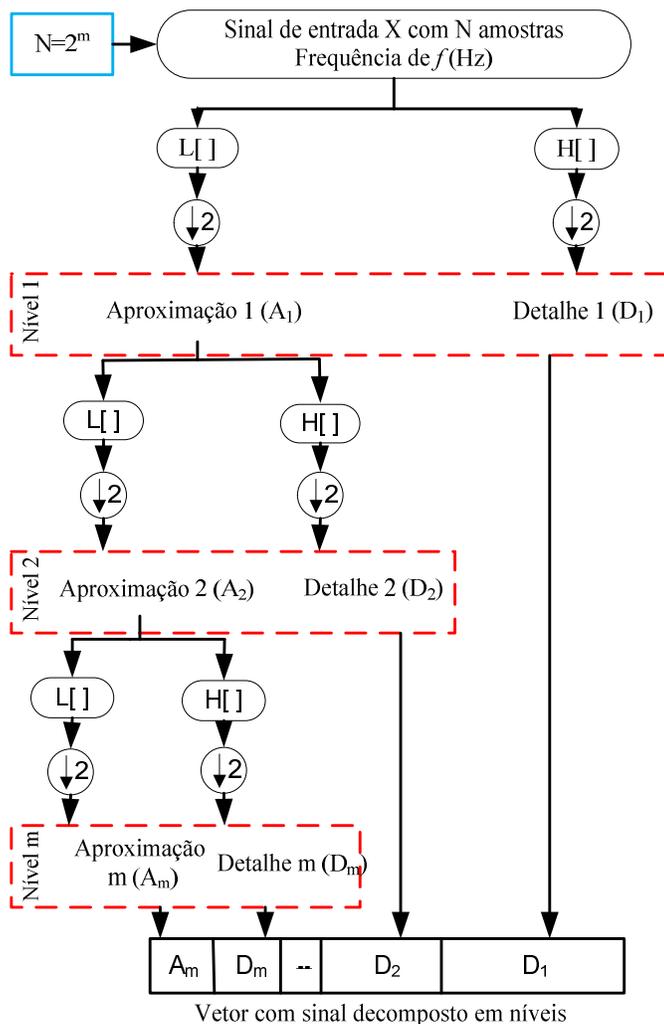
A TW vem sendo utilizada largamente na análise de distúrbios em SEP's, pois essa ferramenta possibilita detectar o início de uma descontinuidade no sinal, quando existente, referenciando-o no domínio do tempo (BARBOSA, 2010). Em diversas aplicações, a TW é feita por meio da implementação por banco de filtros, pois a TWD é um processo de filtragem digital no domínio do tempo, via convolução discreta, acompanhada do operador reamostragem (*downsampling*) por 2 (JENSEN, COUR HARBO, 2000).

A Figura 10 mostra a decomposição em vários níveis de um sinal pela TWD, onde o sinal é filtrado sucessivamente por filtros passa-baixas (L) e passa-altas (H), e aplicado ao operador *downsampling* na saída de cada filtro. O sinal proveniente do filtro passa-baixa representa a aproximação do sinal, e nele estão contidos os sinais de baixa frequência. Já o

*Capítulo 3 – Conceitos sobre Transformada Wavelet*

o sinal proveniente do filtro passa-alta representa o detalhe do sinal em análise, e nele estão contidos os sinais de alta frequência. Este processo de filtragem quando aplicado sucessivamente nas aproximações faz com que o sinal seja dividido ao meio em cada nível de decomposição após a passagem pelos filtros, como mostra a Tabela 2. A obtenção de níveis sucessivos de aproximação e detalhes do sinal original consiste no algoritmo de Análise Multiresolução (AMR) (ADDISON, 2002).

Figura 10 - Decomposição de um sinal utilizando TWD.



Fonte: Adaptado de (BRANCO, 2009).

Tabela 2: Faixas de frequência e número de amostras durante a decomposição do sinal.

Sinal	Faixas de frequência (Hz)	Nº de amostras
X	$0 \sim f$	N
A <sub>1</sub>	$0 \sim f/2$	N/2
D <sub>1</sub>	$f/2 \sim f$	N/2
A <sub>2</sub>	$0 \sim f/4$	N/4
D <sub>2</sub>	$f/4 \sim f/2$	N/4
A <sub>m</sub>	$0 \sim f/2^m$	1
D <sub>m</sub>	$f/2^m \sim f/2^{m-1}$	1

A TW tem como um parâmetro importante a escolha da wavelet mãe a ser empregada para análise do sinal, pois cada família de wavelet tem suas peculiaridades. Conforme aponta a literatura, a família Daubechies geralmente mostra-se uma boa escolha para análise de fenômenos com decaimentos e oscilações rápidas, condições transitórias, que são características destes eventos (BARAN e KIM, 2006).

### 3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram apresentadas algumas características da Transformada Wavelet e suas funções. A TW tem se mostrado como uma ferramenta com grande potencial para aplicação na análise de transitórios em SEP's, permitindo uma análise detalhada do sinal tanto no domínio do tempo quanto da frequência.

#### **4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Diversos trabalhos e pesquisas têm sido realizados no sentido de distinguir as situações de correntes de magnetização (*inrush*) de falta interna em transformadores de potência. A seguir serão apresentados alguns desses trabalhos.

Sharp e Glassburn (1958) apresentam um dos primeiros trabalhos que propõe a utilização das componentes harmônicas de 2º ordem para discriminação entre as correntes de energização e as faltas internas em transformadores. Os autores observaram que as correntes de energização apresentavam um percentual significativo de componentes harmônicas de 2º ordem, o que não ocorria em condições de curto-circuito. As formas de ondas das correntes diferenciais foram analisadas em relação ao conteúdo harmônico de 2º ordem, assim como a magnitude dessa componente em relação à fundamental foi utilizada como critério para restrição dos relés diferenciais.

Rahman e Jeyasurya (1988) apresentam um estudo comparativo entre algoritmos utilizados para proteção diferencial de transformadores de potência. A comparação realizada foi em função da velocidade de resposta, esforço computacional e da capacidade de discriminação entre as condições de energização e faltas internas no transformador. Entre os métodos analisados estão: métodos baseados em ajuste de curvas; transformadas retangulares; e transformada de Fourier.

Bronzeado et al. (1996) realizaram uma análise do conteúdo harmônico presente nas correntes de magnetização durante a energização solidária de transformadores. O trabalho evidencia as características de saturação durante a energização e a importância de considerá-las já que alteram significativamente as amplitudes das correntes e tensões durante o transitório. Os resultados do trabalho mostram que, durante a energização solidária, as componentes harmônicas de ordem par possuem um decaimento relativamente rápido, já as componentes ímpares são incrementadas e mantêm-se durante um período de tempo maior, o que pode alterar o conteúdo harmônico das sobretensões temporárias.

Mao e Aggarwal (2001) apresentaram uma técnica que combina a Transformada Wavelet e a RNA para discriminar as condições de energização das faltas internas em transformadores de potência. Na metodologia proposta, a TW é utilizada para decompor as correntes diferenciais em componentes wavelet, que serão utilizadas para calcular os espectros de energia que serão utilizados pela RNA. A partir dos sinais resultantes da

decomposição da TW, a RNA é utilizada para discriminação dos transitórios envolvendo o transformador. O método apresentado pelos autores mostrou-se, a partir das simulações, robusto e eficiente, apresentando uma eficiência de aproximadamente 99% de acerto dos testes.

Zhang et al. (2002) propôs um novo método para discriminação entre correntes de *inrush* e faltas internas que baseia-se na extração do ângulo "morto" (*dead angle*) das correntes diferenciais utilizando a Transformada Janelada de Fourier (TJF). Para os testes do método, os autores obtiveram os resultados a partir de um protótipo de modelo dinâmico do SEP. Entre as principais vantagens do método, segundo os autores, estão: baixa exigência computacional, robustez perante distorções harmônicas e saturação dos TCs.

Baoming et al. (2005) propuseram um algoritmo que utiliza a indutância instantânea equivalente (IIE) para distinguir as condições de correntes de *inrush* e faltas internas em transformadores de potência. Essa é derivada de uma diferença da permeabilidade magnética devido a saturação e não saturação do núcleo do transformador em situações de *inrush* e falta interna. Os autores propuseram dois critérios de análise, um no domínio do tempo e outro no domínio da frequência, chamados de método direto e indireto, respectivamente. Utilizando o método indireto, os autores identificaram que durante operação normal e situações de faltas internas, a componente de frequência fundamental é quase zero. No entanto, em situações de correntes de *inrush* a componente de frequência fundamental da IIE apresenta uma drástica variação, podendo assim distinguir as situações. No método direto, foi utilizada uma análise da variação de IIE para identificar e distinguir a situação de *inrush* e faltas internas. Em situações de operação normal e faltas internas, o núcleo do transformador não está saturado o que resulta em uma IIE aproximadamente constante. Quando na situação de *inrush*, o núcleo alterna entre as situações de saturado e não saturado fazendo com que IIE varie drasticamente. Em ambos os métodos foi proposto um limiar de ativação para distinguir as situações.

Rahmati e Pasand (2008) propuseram um algoritmo que aplica a Transformada Wavelet na corrente diferencial, de modo a extrair as características da forma de onda. Segundo os autores, quando da ocorrência de *inrush*, no momento do chaveamento, o valor instantâneo da corrente diferencial tem uma taxa de variação de declividade reduzida. No entanto, em situações de faltas internas essa taxa de variação de declividade é grande no momento inicial, decrescendo rapidamente. Com isso, foi utilizado o intervalo de tempo até ser alcançada a amplitude máxima do sinal no intervalo de frequência de 312,5 – 625 Hz, representando o coeficiente de detalhe D4 da decomposição da Transformada Wavelet, para distinguir os transitórios simulados.

#### Capítulo 4 – Revisão Bibliográfica

---

Jialeet et al. (2009) propõem um algoritmo para identificação da indutância de excitação de transformadores de potência trifásicos com conexão estrela-triângulo. O algoritmo proposto é baseado no circuito equivalente do transformador, sendo que a influência das correntes que circulam pelos enrolamentos do delta é eliminada, permitindo que a indutância de excitação seja calculada usando somente as correntes de linha do delta. O trabalho proposto mostrou ser capaz de diferenciar situações de correntes de *inrush* e condições de faltas no transformador, podendo ser aplicado na proteção de transformadores de potência estrela-triângulo.

Lu et al. (2009) apresentaram um trabalho que faz uso da Morfologia Matemática para discriminar as situações de *inrush* e faltas internas. O esquema proposto decompõe os sinais de correntes em níveis de multiresolução baseado em análise e síntese de operadores de Morfologia Matemática, tais como dilatação, erosão, abertura e fechamento. A metodologia propõe um novo Gradiente Morfológico através da aplicação das operações de abertura e fechamento no gradiente morfológico tradicional. Com isso, é possível extrair as mudanças súbitas dos sinais analisados. Segundo os autores, o método é capaz de discriminar as situações de *inrush* e faltas internas mesmo em caso de *inrush* com baixo nível de harmônicos de segunda ordem, e também, em faltas internas com alto nível de segunda harmônica.

Narendra et al (2011) descrevem dois novos princípios baseados na comparação do ângulo diferencial de fase e na taxa de variação da corrente diferencial para a distinção de faltas internas e externas na proteção diferencial de barras e transformadores. O trabalho faz uma comparação entre um método tradicional de relés, método das duas curvas, e o algoritmo proposto. Conforme mencionado no trabalho, durante faltas externas os ângulos de fase são maiores que  $90^\circ$ , e durante faltas internas os ângulos de fase são menores que  $90^\circ$ . A partir disso, o algoritmo monitora os ângulos de fase, sendo que, caso os ângulos sejam maiores que  $90^\circ$  o algoritmo reconhece como uma falta externa e bloqueia a operação do relé. Caso os ângulos sejam menores que  $90^\circ$  o algoritmo identifica como falta interna e permite a operação do relé de proteção. Os autores propuseram uma função adicional ao algoritmo baseada na variação da corrente de operação e da corrente de restrição. Segundo eles, durante faltas internas, a razão de mudança da corrente de operação é maior que a da corrente de restrição, e para faltas externas, a variação da corrente de restrição é maior que da corrente de operação. Os dois princípios são utilizados juntos para prover maior segurança na tomada de decisão das situações de transitórios em transformadores.

#### Capítulo 4 – Revisão Bibliográfica

---

No trabalho de Ashrafian, Rostami e Gharehpetian (2012), é mostrado um método utilizando a Transformada S-Hiperbólica para discriminar os principais transitórios envolvendo transformadores. Segundo os autores, a Transformada S é uma ferramenta multiresolução que contém características tanto da Transformada Wavelet quanto da Transformada de Fourier. A Transformada S é aplicada nas correntes diferenciais das fases o que gera uma matriz  $M \times N$  com elementos complexos. A partir da matriz é calculado o valor médio de cada coluna, resultando em um vetor distância absoluta (*absolute distance vector*), que com este é calculado o índice de desvio absoluto (*absolute deviation index - ADI*). Segundo os testes realizados pelos autores, em situações de falta interna o ADI apresenta valores altos, e para as situações de correntes de *inrush* os valores de ADI são baixos. Já nas situações de faltas internas incipientes, os valores de ADI são menores que em correntes de *inrush*. Para fazer a discriminação dos transitórios os autores utilizaram dois limiares de atuação. Nos testes realizados no método, os autores obtiveram 98,644% de eficiência. Apesar do método proposto pelos autores apresentar uma boa eficiência, a necessidade de dois limiares de atuação torna a metodologia de difícil aplicação real.

Alencar e Bezerra (2013) apresentaram uma metodologia baseada no gradiente da corrente diferencial. O método consiste em calcular o ângulo do vetor gradiente ao longo da curva da corrente diferencial na janela de dados. Como as correntes de *inrush* apresentam uma assimetria em relação ao eixo do tempo, tendo apenas um semi-ciclo completo, é possível distinguir as correntes de *inrush* de faltas internas. Durante as situações de faltas internas o módulo do gradiente e o ângulo apresentam valores elevados, já na situação de *inrush*, o módulo do gradiente e o ângulo apresentam valores reduzidos ou quase nulos. Com isso, através do cálculo do desvio padrão do ângulo do gradiente consegue-se distinguir os transitórios no transformador de potência, pois em situações de *inrush* o desvio é mais elevado, e em faltas internas o desvio padrão apresenta valores reduzidos. Os autores obtiveram bons resultados referentes a discriminação das condições de *inrush* e faltas internas, no entanto, o método proposto necessita de escolha de um limiar de atuação.

Shah, Bhavesh e Bhalja (2013) apresentaram um esquema baseado em Máquinas de Vetores de Suporte (*Support Vector Machine - SVM*) para a discriminação entre correntes de *inrush* e faltas internas. Segundo os autores o uso da SVM tem o objetivo de produzir um modelo que preveja um valor alvo de dados de casos de um conjunto de testes. Inicialmente os autores fazem a configuração da SVM utilizando um conjunto de dados de treinamento. Os dados das correntes diferenciais são decompostos utilizando a Transformada Wavelet e obtido

#### Capítulo 4 – Revisão Bibliográfica

---

o desvio padrão do primeiro nível de detalhe, após é feita a discriminação da situação da falta interna utilizando a SVM. O método proposto pelos autores apresenta uma boa eficiência na discriminação das situações de *inrush* e faltas internas, no entanto são necessários um conjunto de dados prévios para o treinamento da SVM, o que dificultaria a sua aplicação.

Em Ozgonenel e Karagol (2014a) é introduzido um conceito de classificação por Árvores de Decisão (AD) para a proteção de transformadores de potência. Árvores de Decisão é baseada em técnicas de inteligência artificial e é utilizada para distinguir correntes de *inrush* de faltas internas. Para alcançar esse objetivo foram feitos múltiplos treinamentos nas AD em um conjunto aprendiz com amostras de correntes em condições de *inrush* e faltas internas. O objetivo era criar um modelo que poderia prever os valores de um alvo variável utilizando regras de decisão de aprendizado simples. O método foi testado em simulações e em laboratório, sendo os transformadores de 315 MVA e 1 kVA, respectivamente. O método desenvolvido apresentou uma boa eficiência tanto em testes de simulação quanto nos testes laboratoriais, porém para a discriminação dos casos de *inrush* e faltas internas são necessários diversos dados para treinamentos das AD para um correto funcionamento.

Oliveira, Bretas e Ferreira (2014) propuseram um método para proteção diferencial percentual de transformadores de potência trifásicos por meio da Transformada Wavelet Discreta (TWD). No método proposto, os autores utilizam a variação da energia espectral proveniente da decomposição dos sinais das correntes diferenciais pela TWD para a identificação e discriminação das condições de faltas internas, faltas externas e *inrush*. Como critério para discriminação dos transitórios, os autores propuseram um limiar adaptativo que depende do comportamento da corrente diferencial. Segundo os pesquisadores, faltas externas podem gerar pequenas correntes diferenciais, o que faz com que o valor do limiar adaptativo diminua e, conseqüentemente, aumente a zona de restrição do relé. Por outro lado, as altas correntes geradas durante faltas internas aumentam a zona de operação do relé. Os testes foram realizados em diferentes tipos de wavelet mãe, instantes de chaveamento, tipos de faltas e potência de carga. Os resultados apresentados no trabalho mostram que a wavelet mãe da família Daubechies apresentou uma melhor eficiência perante as outras famílias de wavelets. Apesar dos autores implementarem um limiar adaptativo para a tomada de decisão durante os transitórios, o limiar proposto ainda necessita da escolha de um valor percentual fixo para o fator  $k$ , chamado de característica de sensibilidade.

Ahmadi, Samet e Ghanbari (2015) apresentaram o estudo de um método que utiliza o ajuste de curva senoidal. No método, a corrente diferencial é normalizada usando a técnica de

#### Capítulo 4 – Revisão Bibliográfica

---

mínimos quadráticos. A diferença entre a corrente diferencial normalizada e o sinal ajustado é calculada, sendo o valor máximo da diferença utilizado como critério de discriminação entre os transitórios de *inrush* e falta interna. Segundo o apresentado pelos autores, em determinados passos do método são necessários critérios para tomada de decisão que tornam a metodologia de difícil aplicação, pois são necessários testes para obter esses valores de limiar.

Em Wu et al. (2016) os autores propõe um novo esquema para discriminar as correntes de *inrush* e faltas interna utilizando a Morfologia Matemática (MM). O trabalho foi dividido em duas partes, sendo a primeira baseada no Gradiente Morfológico (GM) para identificar os distúrbios sem considerar a saturação dos TC's, e a segunda parte utiliza um critério envolvendo o GM para identificação dos distúrbios sob a condição de saturação dos TC's. Na primeira parte, a distinção é feita pelo fato de que em situações de *inrush* o valor pico-a-pico do segundo nível do GM é maior que o valor pico do primeiro nível do GM. Já para a situação de falta interna o oposto ocorre. Na segunda parte do método, é feito o cálculo para detectar o ângulo simétrico da forma de onda da corrente, denotado por  $\sigma_2$ , se a forma de onda for altamente simétrica o valor de  $\sigma_2$  será próximo de zero. Ainda na segunda parte é feita uma comparação do limiar  $\sigma_3$  com o valor pico-a-pico do primeiro nível de GM. Os autores testaram o esquema proposto em simulações computacionais e em laboratório, sendo a potência dos transformadores de 100 MVA e 15 kVA. Para a distinção entre os transitórios envolvendo os transformadores o esquema proposta necessita de três limiares de atuação.

No trabalho de Zhang et al (2017) é apresentado um novo método que baseia-se em estatísticas de ordem superior (*higher-order statistics*) para a discriminação entre as correntes de *inrush* e faltas internas em transformadores de potência. Segundo os autores, amostras das correntes diferenciais são analisadas e quantificadas utilizando estatística de ordem superior e, a partir das características observadas, são definidos três índices que são utilizados para distinguir os transitórios. Os testes foram realizados para várias condições de operação do transformador, inclusive com saturação dos TC's, e também em um sistema teste real. Os resultados mostram que o método foi eficiente na discriminação das condições de *inrush* e faltas internas, e ainda que o método proposto atuou de maneira mais rápida que o método convencional baseado na restrição pela 2ª harmônica. Apesar dos resultados, o método proposto necessita configuração de pelo menos três índices para poder discriminar as condições de *inrush* e faltas internas, o que pode dificultar a sua aplicação.

#### **4.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Neste capítulo foi apresentada a filosofia da proteção diferencial normalmente utilizada na proteção de transformadores de potência. A proteção diferencial percentual com restrição por harmônicos é atualmente o método de proteção mais utilizado na proteção de transformadores devido a sua simplicidade e sensibilidade de operação. No entanto, o SEP está sujeito a transitórios que podem não ser corretamente identificados pelo método de proteção diferencial convencional, acarretando em atuação indevida da proteção.

## **5 METODOLOGIA PROPOSTA**

### **5.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS**

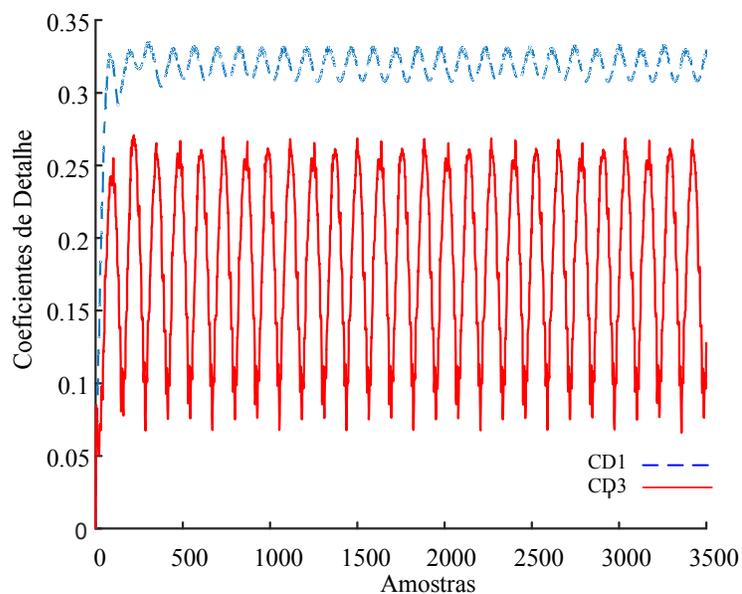
Este capítulo apresenta a metodologia de proteção proposta para identificação e classificação das condições transitórias em que os transformadores de potência estão sujeitos, tendo um enfoque principal nas situações de correntes de *inrush* e faltas internas. Inicialmente é apresentada uma justificativa para o uso da técnica proposta, e também a característica analisada nos sinais das correntes diferenciais que permite a identificação das condições transitórias. Após, os detalhes da implementação da metodologia proposta e o caminho de dados é apresentado para um melhor entendimento.

### **5.2 DESENVOLVIMENTO DA METODOLOGIA**

Visando melhorar a confiabilidade do sistema de proteção, a metodologia proposta neste trabalho busca identificar e diferenciar entre os distúrbios que podem afetar os transformadores de potência dentre os quais destacam-se as correntes de *inrush* e faltas internas.

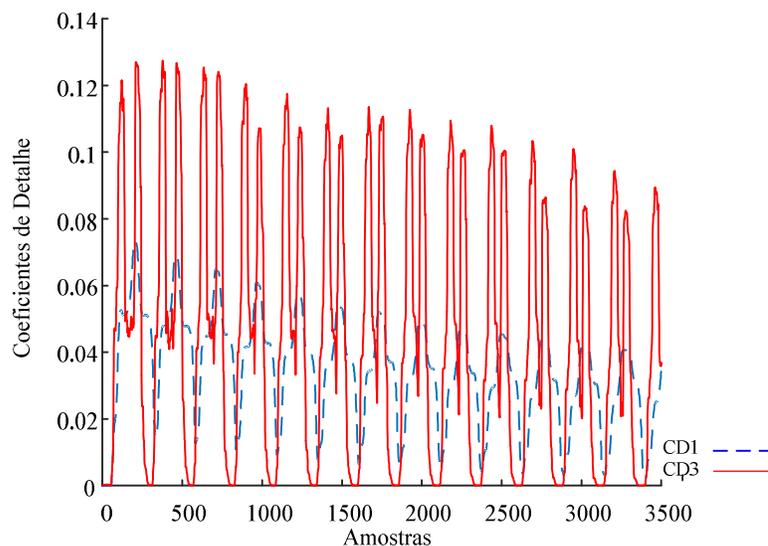
A identificação dos transitórios baseia-se na análise e monitoramento dos Coeficientes de Detalhes (CD) do 1ª e 3º nível de decomposição pela TWD da família Daubechies 'db4'. O uso de diferentes níveis de CD é justificado devido às condições de *inrush* e faltas internas apresentarem um comportamento característico e uma variação distinta dos sinais. Para ilustrar melhor essa situação, os CD do 1º e 3º nível de decomposição para as condições de falta interna e *inrush* são apresentados na Figura 11 e Figura 12, respectivamente.

Figura 11 - Comportamento dos coeficientes de detalhes do 1º e 3º nível de decomposição da TWD durante condição de falta interna em 10% das espiras da fase A no lado de alta tensão.



Fonte: produzida pelo autor.

Figura 12 - Comportamento dos coeficientes de detalhes do 1º e 3º nível de decomposição da TWD durante condição de *inrush*.



Fonte: produzida pelo autor.

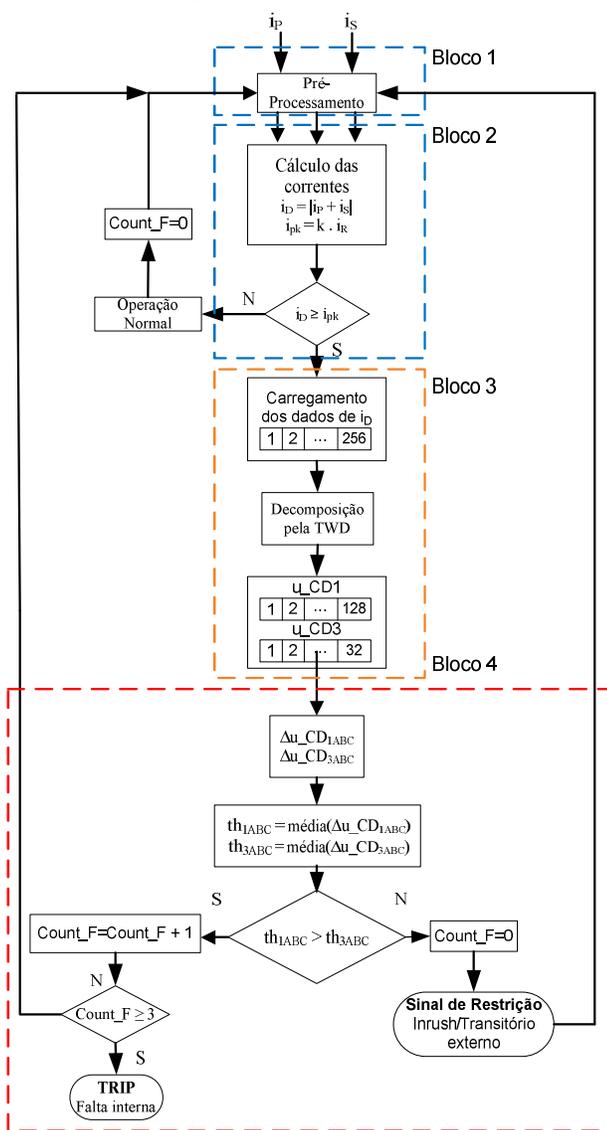
Analisando a Figura 11, é possível verificar que durante a condição de curto-circuito interno, o CD do 1º nível de decomposição apresenta uma variação súbita e elevada, com um pico de amplitude maior e mais constante que o CD de 3º nível durante todo o tempo. Para a condição de *inrush* apresentada na Figura 12, por exemplo, o oposto ocorre, isto é, o CD do 3º

*Capítulo 5 – Metodologia Proposta*

nível apresenta uma grande variação de amplitude do sinal, enquanto que o CD do 1º nível apresenta uma pequena variação da amplitude. Considerando estas características apresentadas pelos CDs, a metodologia proposta não necessita de uma pré-configuração de um limiar para identificação das condições transitórias que ocorrem no transformador de potência, sendo apenas necessário monitorar e comparar a variação dos CD dos níveis de decomposição da TWD. Para o desenvolvimento do algoritmo da metodologia e avaliação dos casos simulados foi utilizado o software Matlab®.

Na Figura 13 é apresentado o fluxograma da metodologia proposta, e posteriormente, o passo a passo do tratamento dos dados de entrada.

Figura 13 - Fluxograma da metodologia proposta.



Fonte: produzida pelo autor.

### Bloco 1: Pré-Processamento dos dados

No sistema elétrico simulado no ATP, os dados foram obtidos a uma frequência de amostragem de 20kHz, sendo o tempo total de simulação de 0,4 segundos. A partir dos dados obtidos no software, primeiramente, os dados das correntes diferenciais são filtrados utilizando um filtro passa-baixa do tipo *Butterworth* de 2ª ordem, com uma frequência de corte de 480 Hz. Após, os dados são reamostrados para uma frequência de 15,36 kHz, para que se tenham 256 amostras/ciclo.

O transformador utilizado no sistema elétrico em análise neste trabalho, possui conexão do tipo  $\Delta$ -Y, fazendo com que as correntes do primário e secundário apresentem uma defasagem de  $30^\circ$  entre si. A correção da defasagem angular é feita multiplicando as correntes das fases por uma matriz de compensação. O IEEE Std. C37.91 (2008) mostra como fazer a compensação de acordo com a configuração dos enrolamentos do transformador. A equação (15) mostra como é feito o cálculo para correção angular.

$$\begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (15)$$

Sendo  $i_a$ ,  $i_b$  e  $i_c$  as correntes instantâneas dos TCs a serem compensadas e  $i_A$ ,  $i_B$  e  $i_C$  as correntes já compensadas. Neste trabalho a correção angular será feito nas correntes do lado delta.

Na próxima etapa do pré-processamento dos dados é feita a eliminação da componente de sequência zero do lado Y do transformador para evitar desequilíbrio nas correntes diferenciais. A compensação da componente de sequência zero ( $i_0$ ) é realizada conforme a relação a seguir (IEEE Std. C37.91, 2008):

$$\begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_a - i_0 \\ i_b - i_0 \\ i_c - i_0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

Sendo:

$$i_0 = \frac{1}{3}(i_a + i_b + i_c) \quad (17)$$

Fazendo a substituição em (16):

$$\begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_a - \frac{1}{3}(i_a + i_b + i_c) \\ i_b - \frac{1}{3}(i_a + i_b + i_c) \\ i_c - \frac{1}{3}(i_a + i_b + i_c) \end{bmatrix} \quad (18)$$

Simplificando (18), tem-se:

$$\begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (19)$$

Onde  $i_A$ ,  $i_B$  e  $i_C$  são as correntes instantâneas do enrolamento em Y, com a compensação da componente de sequência zero já realizada.  $i_a$ ,  $i_b$  e  $i_c$  são as correntes do lado secundário do transformador a serem compensadas.

### Bloco 2: Detecção de transitório

Após os dados das correntes passarem pelo pré-processamento, é realizado o cálculo da corrente diferencial e de restrição nas três fases, dados pelas equações (20) e (21), e em seguida verificado a extrapolação da corrente de *pickup*, equação (22), com a declividade percentual previamente ajustada no relé diferencial.  $k$  é a característica diferencial percentual do relé, a qual foi adotado o valor de  $k = 0,3$ .

$$\begin{bmatrix} i_{D(n)}^a \\ i_{D(n)}^b \\ i_{D(n)}^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |i_{p(n)}^a + i_{s(n)}^a| \\ |i_{p(n)}^b + i_{s(n)}^b| \\ |i_{p(n)}^c + i_{s(n)}^c| \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$\begin{bmatrix} i_{R(n)}^a \\ i_{R(n)}^b \\ i_{R(n)}^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |i_{p(n)}^a - i_{s(n)}^a| \\ |i_{p(n)}^b - i_{s(n)}^b| \\ |i_{p(n)}^c - i_{s(n)}^c| \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$\begin{bmatrix} i_{pk(n)}^a \\ i_{pk(n)}^b \\ i_{pk(n)}^c \end{bmatrix} = k * \begin{bmatrix} i_{R(n)}^a \\ i_{R(n)}^b \\ i_{R(n)}^c \end{bmatrix} \quad (22)$$

Sendo  $i_{p(n)}^{(ABC)}$  e  $i_{s(n)}^{(ABC)}$  as correntes instantâneas do primário e secundário provenientes dos TCs, respectivamente, e  $na$  amostra atual da corrente.

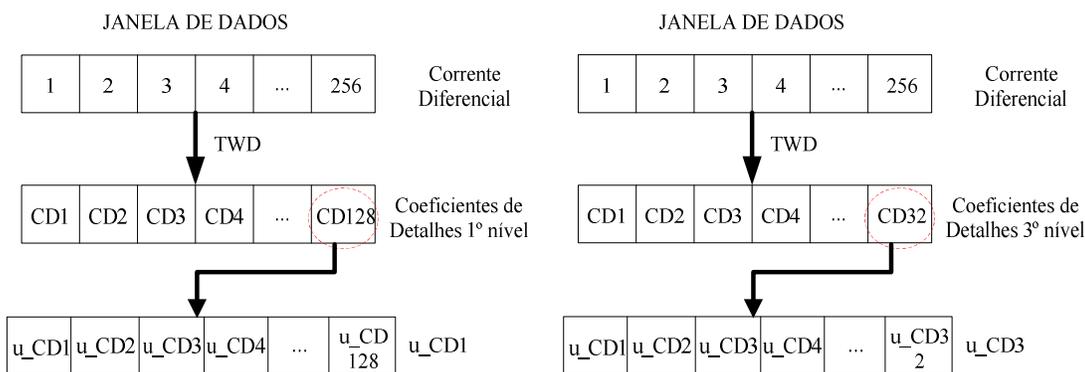
Se  $i_{D(n)}^{(ABC)} \geq i_{pk(n)}^{(ABC)}$ , o algoritmo passa para o próximo bloco e inicia a decomposição das correntes diferenciais pela TWD.

### Bloco 3: Decomposição pela TWD

Nesta etapa do algoritmo, os dados das correntes diferenciais são armazenados em vetores com 256 amostras (para cada fase) para serem decompostos pela TWD da família Daubechies (“db4”). Como resultado da decomposição da TWD, geram-se vetores contendo 128 e 32 coeficientes de detalhes para o 1º e 3º nível de decomposição, respectivamente. Para análise wavelet dos dados nesta etapa do algoritmo, foram utilizadas funções existentes no software Matlab®, tais como a *wavedec*, para a decomposição do sinal das correntes diferenciais, e a função *detcoef*, que é responsável pela extração dos coeficientes de detalhes.

De modo a evitar a análise de todos esses dados, considerou-se somente a última amostra dos CD, ou seja, a posição 128 e a posição 32, para o 1º e 3º nível de decomposição, respectivamente. Essa última amostra dos CD dos níveis são atribuídas a vetores com tamanho de 128 e 32 posições. Deste modo, facilita e agiliza a análise, pois uma menor quantidade de dados é monitorada, além de diminuir significativamente a quantidade de dados armazenados. A Figura 14 mostra como funciona a análise dos dados.

Figura 14 - Janela de dados para análise das amostras dos CD.



Fonte: produzida pelo autor.

### Bloco 4: Identificação e discriminação de transitórios

Com as correntes diferenciais das fases decompostos pela TWD, a identificação dos transitórios no método proposto é baseado no cálculo da variação das amostras dos CD ( $u_{CD}$ ) do 1º e 3º nível presentes nos respectivos vetores utilizando as equações (23) e (24).

$$\Delta u_{CD_{1ABC}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [u_{CD_1}(i) - \overline{u_{CD_1}}]^2} \quad (23)$$

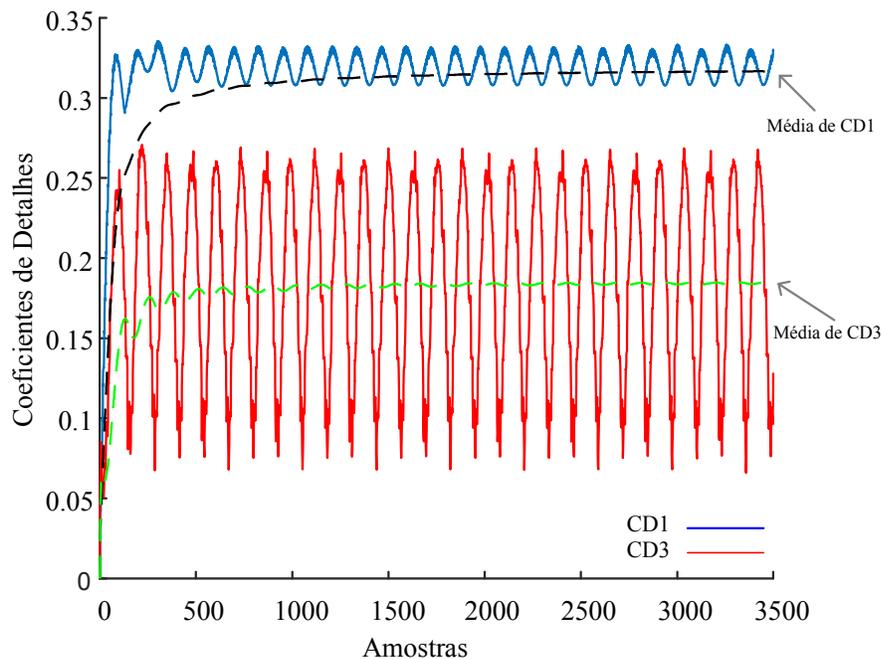
$$\Delta u_{CD_{3ABC}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [u_{CD_3}(i) - \overline{u_{CD_3}}]^2} \quad (24)$$

Onde  $N$  é o número de amostras,  $i$  a amostra atual,  $u_{CD}$  os coeficientes de detalhes e  $\overline{u_{CD}}$  a média dos coeficientes de detalhes.

Cabe salientar que o cálculo de  $\Delta u_{CD}$  é realizado conforme as correntes diferenciais vão sendo decompostos pela TWD, não sendo necessário esperar as 128 amostras do 1º nível de detalhe ou as 32 amostras do 3º nível de detalhe. Deste modo, o sistema de proteção torna-se rápido na identificação dos transitórios, permitindo identificar tais condições já para os primeiros dados de entrada.

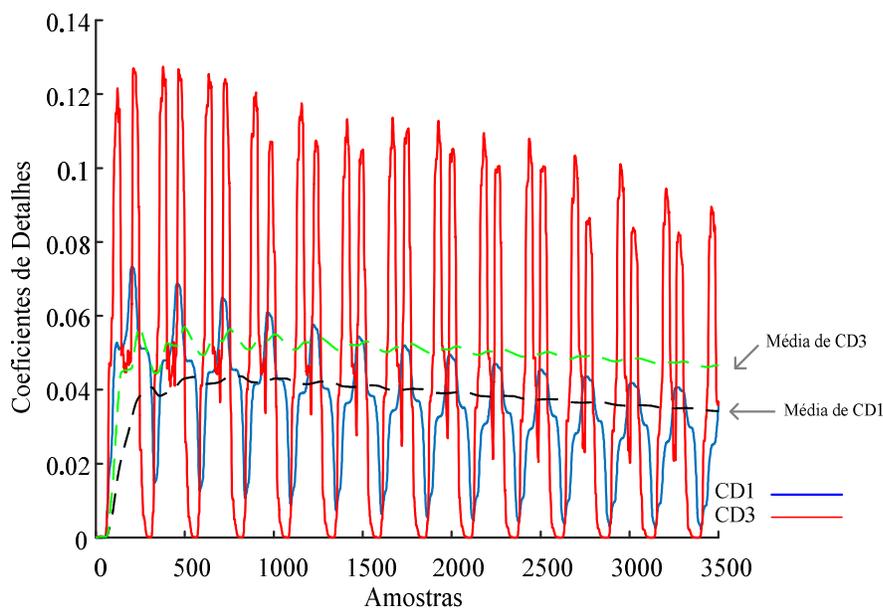
Como pode ser visto na Figura 12, durante a condição de *inrush* os CD de 3º nível de decomposição apresentam uma significativa variação de amplitude entre as amostras, tornando-se em alguns momentos menor que os CD do 1º nível de decomposição. Já os CD do 1º nível, apresentam uma variação de amplitude pequena das amostras. Assim, devido a essa característica no comportamento da variação dos níveis de decomposição da TWD analisados neste trabalho, considerou-se o cálculo da média da variação dos CD para o 1º e 3º nível, dados pelas equações (25) e (26). Com essa abordagem, permite-se avaliar melhor o comportamento das amostras dos níveis de decomposição analisados e evita-se a identificação equivocada durante a análise dos distúrbios, como mostram a Figura 15 e Figura 16.

Figura 15 - Análise da variação dos CD de 1º e 3º nível durante a condição de falta interna.



Fonte: produzida pelo autor.

Figura 16 - Análise da variação dos CD de 1º e 3º nível durante a condição de correntes de inrush.



Fonte: produzida pelo autor.

$$th_{d1} = média(\Delta_u CD_1) \quad (25)$$

$$th_{d3} = média(\Delta_u CD_3) \quad (26)$$

Após o cálculo dos valores médios da variação dos CD, o método verifica se o valor de  $th_{d1}$  é maior que o  $th_{d3}$ . Se  $th_{d1} > th_{d3}$ , o método incrementa o contador  $Count\_F$  em 1, e após, verifica se  $Count\_F \geq 3$ . Caso  $Count\_F$  for maior ou igual 3, a metodologia identifica como uma condição de falta interna e envia um sinal de *trip* para o sistema de proteção. Se  $th_{d1} < th_{d3}$ , o contador  $Count\_F$  é ressetado e um sinal de restrição é enviado para o sistema de proteção e o transitório é identificado como *inrush*/transitório externo. É importante salientar que  $Count\_F$  só será maior ou igual a 3 se três dados consecutivos de  $th_{d1}$  forem maiores que  $th_{d3}$ . O uso do  $Count\_F$  no método permite uma maior confiabilidade para o relé de proteção, pois evita que, por exemplo, apenas um dado esporádico satisfaça a condição de  $th_{d1} > th_{d3}$  e já caracterize como uma condição de falta interna.

### 5.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A capacidade de identificação e classificação dos transitórios envolvendo o transformador de potência pela metodologia proposta é fundamentada a partir da análise e monitoramento da variação dos coeficientes de detalhes do 1º e 3º nível de decomposição da TWD. A metodologia é de fácil implementação e não necessita de um limiar de atuação (*setting free*), o que a torna promissora para aplicação na proteção de transformadores de potência. No próximo capítulo serão apresentados os resultados e discussões dos testes realizados na metodologia de proteção proposta.

## **6 SISTEMA TESTE E FENÔMENOS A SEREM ESTUDADOS**

### **6.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS**

O software ATP vem sendo utilizado em diversas áreas de pesquisas que envolvem o estudo de transitórios eletromagnéticos. Sua utilização em SEP é amplamente conhecida devido a sua qualidade e flexibilidade para a simulação de transitórios.

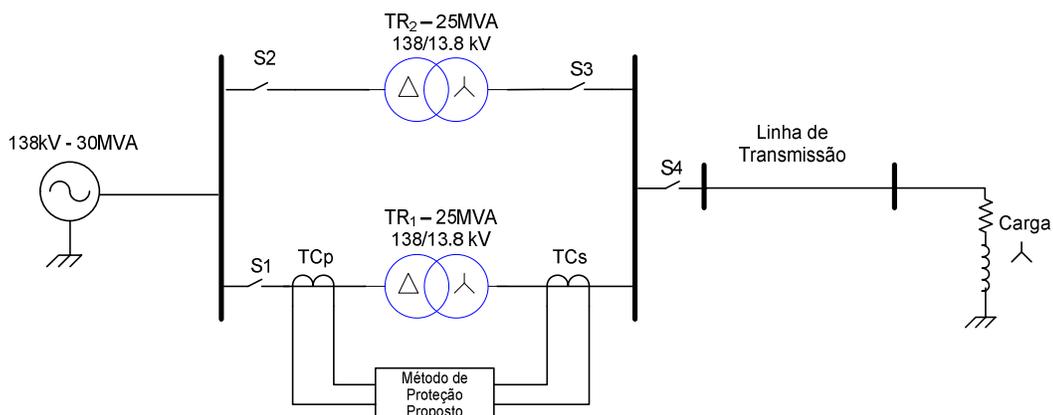
O desenvolvimento de um circuito de simulação mais próximo do real torna-se importante para a obtenção de dados e validação de metodologias de proteção. Deste modo, neste capítulo serão apresentados os diversos componentes do sistema elétrico utilizado para a obtenção dos dados para teste da metodologia proposta neste trabalho.

### **6.2 SISTEMA TESTE**

Com o objetivo de testar o método proposto, foi utilizado o software EMTP/ATP para a modelagem de um sistema elétrico para a simulação e obtenção de dados de diferentes condições de operação do transformador de potência, como mostra a Figura 17. O sistema elétrico é composto por uma fonte equivalente de 138 kV, potência nominal de 30 MVA, frequência de 60 Hz, conectado a dois transformadores de potência trifásicos de 25 MVA conectados em paralelo, ambos com relação de transformação de 138 kV para 13,8 kV, ligação triângulo-estrela aterrado. Também compõe o sistema, os transformadores de corrente (TC) para medição das correntes do lado primário e secundário de um dos transformadores de potência, ambos ligados em Y, sendo a relação de transformação no primário de 200:5 e no secundário de 2000:5. A conexão com a carga de 25MVA, fator de potência de 0,92 indutivo, é feita por uma linha de distribuição com 5 km de extensão.

Para possibilitar a simulação das condições de operação, foram inseridas chaves em diferentes pontos do sistema elétrico. Os componentes do sistema elétrico foram modelados na forma de cartões de simulação para o software ATP. No Apêndice B é apresentado um exemplo de descrição do sistema elétrico utilizado para simulação no software ATP.

Figura 17 - Sistema elétrico analisado.



Fonte: produzida pelo autor.

### 6.2.1 Fonte equivalente

Os geradores são equipamentos fundamentais para o SEP, sendo responsáveis pela geração da energia elétrica. No sistema elétrico modelado, utilizou-se um gerador síncrono trifásico, com tensão de 138 kV, frequência de 60Hz. Para a representação do gerador, utilizou-se uma modelagem simplificada no ATP, sendo escolhida a fonte tipo 14 (ATP, 1987), fonte do tipo cossenoidal. A tensão fornecida pelo gerador é dada pela equação (14).

$$V(t) = Vm * \cos(2\pi ft + \varphi) \quad (14)$$

Sendo que:

$V_m$  – valor da tensão de pico (Volts).

$f$  – frequência (Hz).

$t$  – tempo (s).

$\varphi$  - defasagem angular.

Na Tabela 3 são apresentados os parâmetros do gerador no cartão de entrada do ATP.

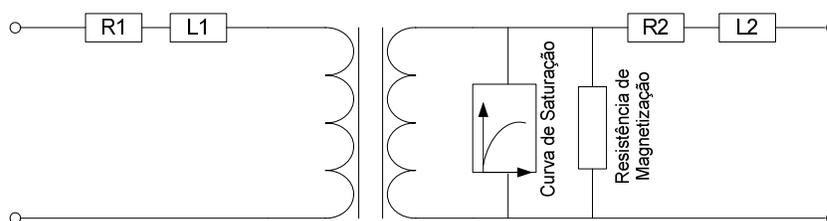
Tabela 3 - Parâmetros da fonte equivalente.

Parâmetro	Valor
Resistência de sequência zero ( $R_0$ )	7,596 $\Omega$
Resistência de sequência positiva ( $R_+$ )	7,1003 $\Omega$
Indutância de sequência zero ( $L_0$ )	115,45mH
Indutância de sequência positiva ( $L_+$ )	53,99mH

### 6.2.2 O transformador de potência

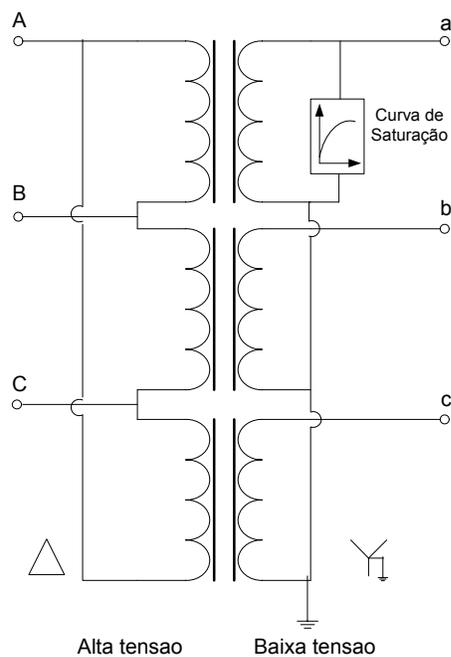
Os transformadores exercem um papel importante no SEP, sendo responsáveis pela interligação entre os ramos do SEP (geração, transmissão e distribuição), além de determinar os níveis de tensões, elevando ou diminuindo a tensão (BARBOSA, 2010).

Para a modelagem dos transformadores de potência, utilizou-se o modelo saturável do ATP (*saturable transformer*), incluindo a relação de transformação, curva de saturação, particionamento dos enrolamentos delta e estrela, o que permite a simulação de faltas internas em diferentes porções das espiras. A Figura 18 e Figura 19 apresentam o modelo de transformador monofásico saturável e a composição do transformador trifásico para a modelagem do sistema elétrico, respectivamente. O transformador trifásico utilizado possui tensão de 138 kV/13,8 kV, conexão  $\Delta$ -Y aterrado.

Figura 18 - Modelo do transformador (*saturable*) monofásico utilizado no ATP.

Fonte: produzida pelo autor.

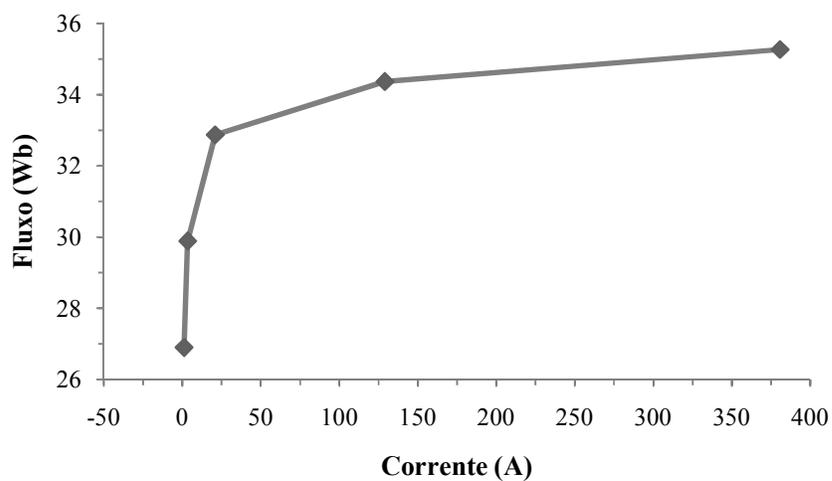
Figura 19 - Detalhes da conexões dos enrolamentos para o transformador trifásico.



Fonte: produzida pelo autor.

Na Figura 20 é apresentada a curva de saturação do transformador de potência obtida com a rotina *Saturation* (ATP, 1987).

Figura 20 - Curva de saturação do transformador de potência.

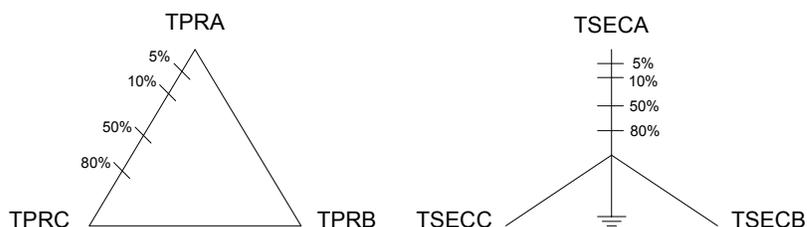


Fonte: Adaptado de (BERNARDES, 2006).

*Capítulo 7 – Resultados e Discussões*

A partir da modelagem completa do transformador é possível a simulação de faltas internas em partições dos enrolamentos tanto do primário quanto do secundário nas três fases do equipamento. Para este trabalho, os enrolamentos foram divididos em 5%, 10%, 50% e 80% do total, sendo tomado como referência o terminal da fase para o lado delta e o neutro para o lado em estrela, Figura 21.

Figura 21 - Divisão em percentagem dos enrolamentos primário ( $\Delta$ ) e secundário (Y).



Fonte: produzida pelo autor.

Na Tabela 4 e Tabela 5 são apresentados os dados referente a divisão dos enrolamentos do lado delta (primário) e do lado estrela (secundário) que foram utilizados nos cartões de simulação do ATP para as faltas internas nas espiras.

Tabela 4 - Divisão dos enrolamentos primário ( $\Delta$ ), em 5%, 10%, 50% e 80%.

Conexão	Percentagem do enrolamento	Resistência ( $\Omega$ )	Indutância (mH)	Tensão (kV)
TPRA-N05TA	5%	0,0524	4,542	6,90
N05TA -N10TA	5%	0,0524	4,542	6,90
N10TA-N50TA	40%	0,4192	36,332	55,20
N50TA-N80TA	30%	0,3144	27,249	41,40
N80TA-TPRB	20%	0,2096	18,166	27,60

Tabela 5 - Divisão dos enrolamentos secundário (Y), em 5%,10%, 50% e 80%.

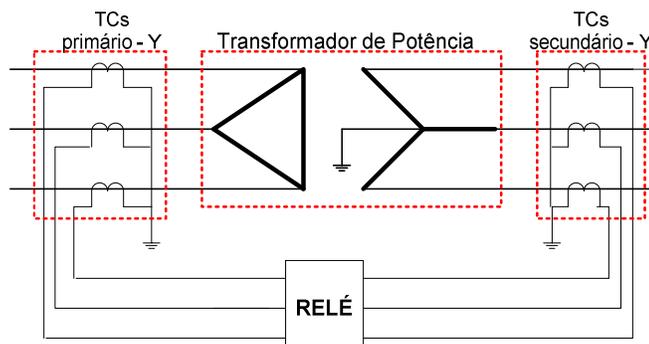
<b>Conexão</b>	<b>Percentagem do enrolamento</b>	<b>Resistência (<math>\Omega</math>)</b>	<b>Indutância (mH)</b>	<b>Tensão (kV)</b>
<b>TSECA-N80EA</b>	20%	0,00350	0,3028	1,5934
<b>N80EA-N50EA</b>	30%	0,00525	0,4542	2,3901
<b>N50EA-N10EA</b>	40%	0,007	0,6056	4,7802
<b>N10EA- N05EA</b>	5%	0,000875	0,0757	0,39835
<b>N05EA-NEUT1</b>	5%	0,000875	0,0757	0,39835

### 6.2.3 Os transformadores de corrente

Os transformadores de corrente (TC's) 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 (MAMEDE FILHO, 2013).

Para a representação dos TC's no sistema teste estudado, foi utilizado o modelo do transformador saturável do software ATP conectado em estrela em ambos os lados do transformador de potência, como mostra a Figura 22. Este tipo de conexão dos TC's faz com que se mantenha a defasagem angular de  $30^\circ$  da ligação  $\Delta$ -Y do transformador. Essa defasagem pode ser corrigida ligando o TC do lado em  $\Delta$  do transformador de potência em Y, e o TC do lado em Y do transformador de potência em  $\Delta$ . No entanto, neste trabalho a correção da defasagem será feita no algoritmo proposto.

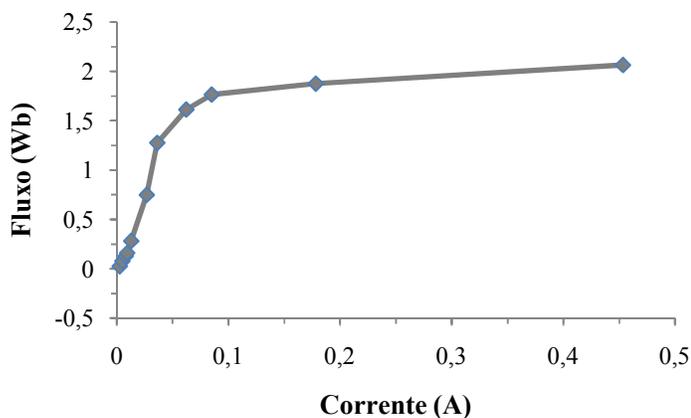
Figura 22 - Esquema de conexão dos TCs.



Fonte: Adaptado de (BARBOSA, 2010).

A relação de transformação dos TC's foi de 200:5, para o primário (138 kV), e 2000:5 para o secundário (13,8 kV). Para uma representação mais completa dos TC's no sistema estudado, foi considerada a curva de saturação e demais parâmetros, como mostram a Figura 23 e a Tabela 6, respectivamente. Embora haja diferença na relação de transformação dos TC's utilizados, os parâmetros dos equipamentos são os mesmos.

Figura 23 - Curva de saturação dos transformadores de corrente.



Fonte: Adaptado de (BERNARDES, 2006).

Tabela 6 - Parâmetros para os TC's.

Parâmetro	Valor
Indutância de dispersão do primário	$1,0 \times 10^{-4} \text{H}$
Resistência de dispersão do primário	$0,85 \Omega$
Indutância de dispersão do secundário	$1,0 \times 10^{-4} \text{H}$
Resistência de dispersão do secundário	$1,0 \times 10^{-4} \Omega$

### 6.2.4 A linha de transmissão

A linha de transmissão utilizada foi do tipo mutuamente acoplada, tensão de 13,8 kV e 5 km de comprimento. Para esse tipo de representação deve-se dispor das matrizes de acoplamento [R] e [L] da linha a ser utilizada, e com a transformada de Karrenbauer obtêm-se as componentes simétricas de sequência da linha de transmissão (Can/Am EMTP User Group, 1987). Os parâmetros de entrada da linha no cartão de simulação do ATP são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Parâmetros para da linha de transmissão.

Parâmetro	Valor
Resistência de sequência zero ( $R_0$ )	0,7186 $\Omega$
Resistência de sequência positiva ( $R_+$ )	0,3101 $\Omega$
Indutância de sequência zero ( $L_0$ )	11,45mH
Indutância de sequência positiva ( $L_+$ )	2,41mH

### 6.2.5 A carga

Para estudo do sistema elétrico, foram considerados três valores de potência de carga conectado ao sistema: 1) carga leve com 1,25 MVA; 2) carga média de 10 MVA; e 3) carga pesada de 23,75 MVA. A carga tem um fator de potência de 0,92 e foi conectada em estrela aterrado. Os dados das cargas utilizadas estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Dados das cargas.

Potência da carga (MVA)	Parâmetros	
	Resistência ( $\Omega$ )	Indutância (mH)
1,25	140,17	158,36
10	17,52	19,79
23,75	7,38	8,33

### 6.3 FENÔMENOS ESTUDADOS

A validação da metodologia proposta foi realizada a partir de dados obtidos de simulações de diferentes condições de operação do sistema elétrico apresentado neste trabalho. O objetivo das simulações é de gerar dados das correntes diferenciais das fases para análise da metodologia. Um total de 648 cenários foram simulados no ATP, dentre as condições de operação simuladas estão:

- Energização do transformador a vazio e com carga;
- Energização do transformador com falta interna;
- Energização do transformador com falta interna entre espiras (*turn-to-turn*);
- Energização solidária (*Sympathetic inrush*);
- Energização com discordância de fases;
- Faltas internas no transformador;
- Faltas internas entre espiras do transformador (*turn-to-turn*);
- Faltas externas próximas ao TC e na linha de transmissão;
- Sobreexcitação;
- Erro na relação de transformação dos TC's.

Para as condições de faltas simuladas, foram consideradas os seguintes tipos: i) fase A; ii) fase A-T; iii) fases A-B; iv) fases A-B-T; v) fases A-B-C; vi) fases A-B-C-T. As faltas internas foram realizadas em porcentagens de espiras do transformador de potência, ou seja, em 5%, 10%, 50% e 80%. As faltas entre as espiras (*turn-to-turn*) foram realizadas entre 5%-10%, 5%-50%, 5%-80%, 10%-50%, 10%-80% e 50%-80% da fase A. Outro tipo de falta interna simulada foi dentro da região protegida, ou seja, entre os TC's e o transformador de potência, para isso considerou-se uma resistência de falta de 0,1 $\Omega$ , 10 $\Omega$  e 100 $\Omega$ .

As faltas externas foram realizadas em dois pontos do sistema elétrico: 1) Próximo ao TC do lado secundário (fora da região protegida) e 2) Linha de transmissão próximo a carga.

Na condição de sobreexcitação foi considerado um aumento na tensão de alimentação do transformador de 110% a 140% em relação à tensão nominal.

## *Capítulo 7 – Resultados e Discussões*

---

Para a simulação da condição de energização solidária, considerou-se que o transformador TR1 já estava energizado e então energizou-se o transformador TR2.

Na condição de energização com discordância de fases, foi realizado o fechamento das chaves de cada fase com uma diferença de tempo de 0,01 s.

As condições de erro na relação de transformação dos TC's foi considerada para um erro de 10% a 80%.

Para todas as condições de simulação foi realizado a variação do ângulo de incidência de tensão/falta, conforme mostra a Tabela 9.

Tabela 9 - Ângulos e tempos para incidência de tensão/falta.

Ângulo	Tempo (s)
0°	0,1468
45°	0,1490
60°	0,1497
90°	0,1515

## **6.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Neste capítulo foram apresentados os detalhes do sistema elétrico considerado durante os estudos no software ATP/EMTP, assim como os diferentes tipos de condições de operação e distúrbios simulados, para fins de validação da metodologia proposta. O detalhamento mais próximo do real de um sistema elétrico para a aquisição de dados é necessário para a realização de testes e validação de metodologias de proteção, permitindo que se tenha uma maior confiabilidade e domínio quanto ao seu funcionamento.

## **7 RESULTADOS E DISCUSSÕES**

### **7.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS**

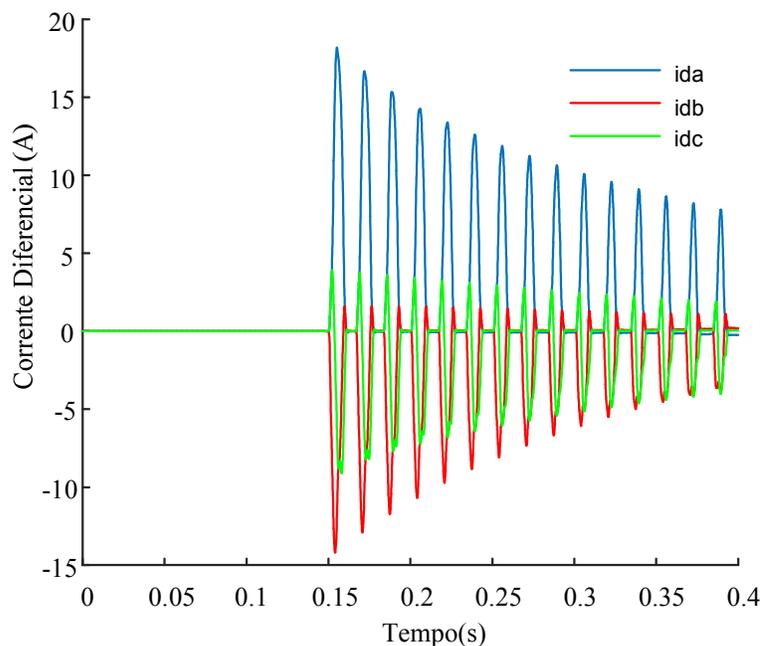
Os transformadores de potência estão sujeitos a diversos tipos de distúrbios quando conectados aos SEP. Alguns desses distúrbios podem acarretar grandes prejuízos quando não identificados pelo relé de proteção, como por exemplo as faltas internas, ou quando identificados equivocadamente, implicando em uma atuação indevida da proteção, como por exemplo, durante as correntes de *inrush*. Desta maneira, com o intuito de testar a metodologia proposta realizaram-se diversas simulações no sistema teste implementado no ATP/EMTP, conforme descrito no Capítulo 5. Para cada caso estudado, objetivo-se avaliar a capacidade de identificação e discriminação do método, assim como o seu desempenho em relação ao tempo. Ainda neste escopo, a metodologia proposta neste trabalho foi comparada com o método de proteção convencional (restrição pela 2ª harmônica) e um método proposto no estado da arte, apresentado por Oliveira et al (2014). A seguir serão apresentados alguns dos resultados do método proposto durante os testes.

### **7.2 ENERGIZAÇÃO DO TRANSFORMADOR (INRUSH)**

Com o intuito de verificar o comportamento do método proposto e sua capacidade de identificar as condições de correntes de *inrush* que podem sensibilizar o relé de proteção, foram consideradas situações de energização a vazio (sem carga) e energização com carga. Durante essas simulações considerou-se que o transformador estava desconectado do SEP (chave  $S_1$  aberta), quando em determinado momento a chave  $S_1$  é fechada, iniciando a energização. Nas condições de energização a vazio a chave  $S_4$ , Figura 17, foi mantida aberta durante todo o instante de tempo.

A Figura 24 ilustra as correntes diferenciais para uma condição de energização em vazio com ângulo de incidência de tensão em  $0^\circ$ . Nota-se que as correntes apresentam um comportamento característica da energização, com as correntes diferenciais das fases com uma elevada magnitude inicial que vai decaindo ao longo do tempo.

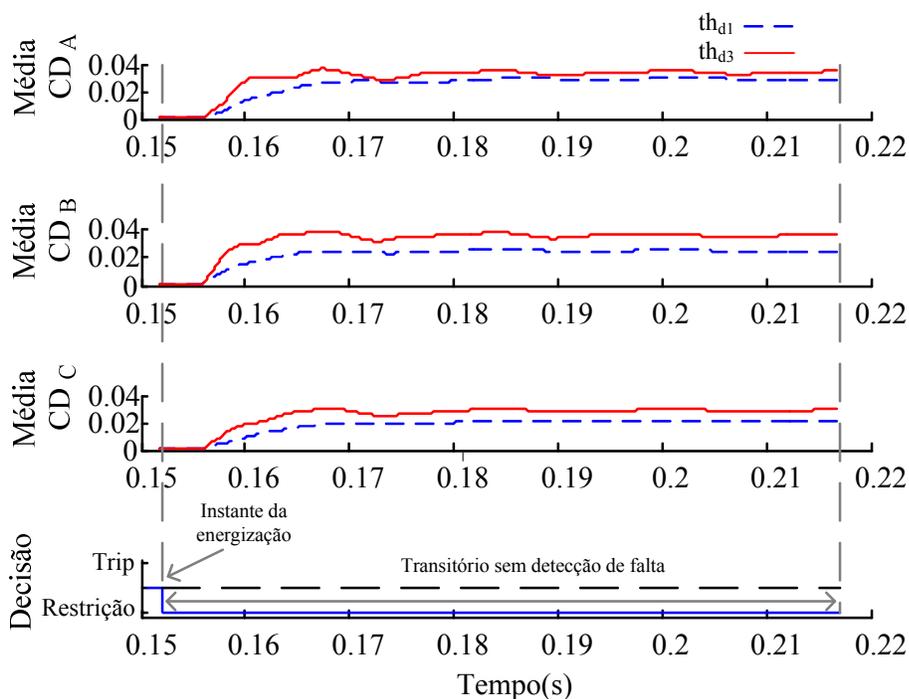
Figura 24 - Correntes diferenciais durante a condição de energização do transformador, ângulo de incidência de 0°.



Fonte: produzida pelo autor.

Na Figura 25 é apresentado o comportamento da metodologia proposta durante a condição apresentada anteriormente. Como é possível verificar, o  $th_{d1}$  é menor que  $th_{d3}$  durante todo o instante de tempo para as três fases fazendo com que a metodologia identificasse de maneira correta o transitório, enviando um sinal de restrição para o relé de proteção mantendo o transformador em operação normal.

Figura 25 - Variação dos CD do 1º e 3º nível de decomposição para uma condição de *inrush*, e sinal de decisão do método.



Fonte: produzida pelo autor.

### 7.3 CONDIÇÕES DE FALTAS INTERNAS NO TRANSFORMADOR

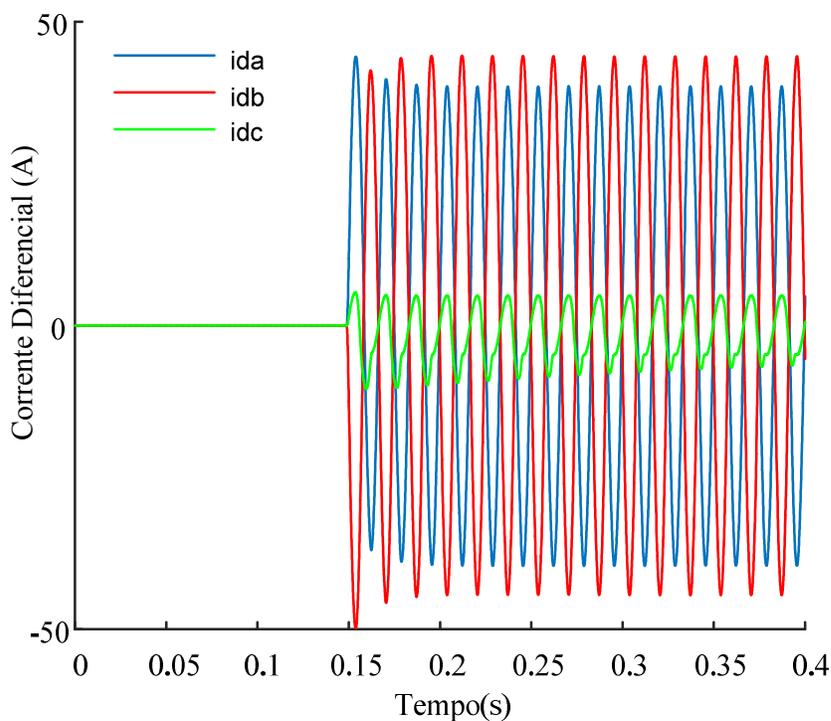
As condições de faltas internas que podem ocorrer nos transformadores de potência são uns dos desafios para o sistema de proteção, pois sua correta identificação e tempo de resposta do método de proteção são essenciais para a confiabilidade do SEP. Nesta seção serão apresentados os resultados dos diferentes tipos de faltas internas testados na metodologia proposta.

#### 7.3.1 Energização com falta interna

O transitório que surge durante a energização do transformador exige que o relé de proteção esteja preparado para identificar e evitar um desligamento indevido. No entanto, quando o transformador é energizado sob falta surge uma condição peculiar para o sistema de proteção, pois além da corrente de *inrush* há a corrente de falta, tornando mais complexa a sua

correta identificação. A Figura 26 ilustra as correntes diferenciais para a condição em que o transformador foi energizado com falta interna no primário em 10 % dos enrolamentos da fase A e a terra, para um ângulo de incidência de falta de 60°.

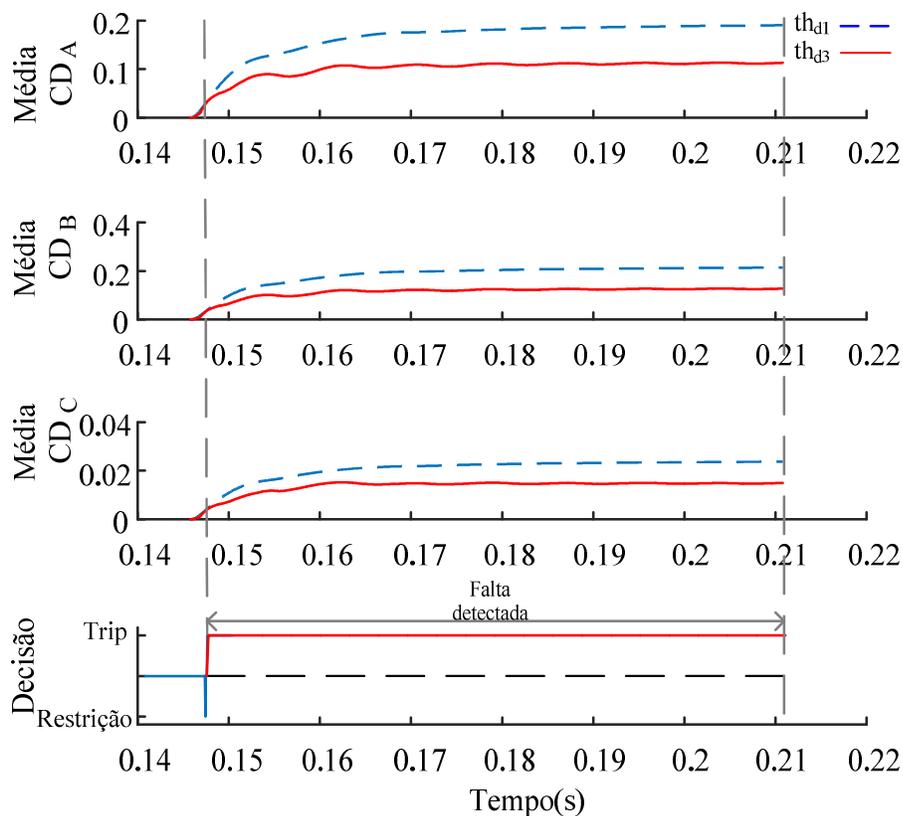
Figura 26 - Correntes diferenciais durante a condição de energização com falta interna em 10% dos enrolamentos da fase A-T do primário, ângulo de 60°.



Fonte: produzida pelo autor.

A Figura 27, que apresenta o comportamento do método perante a energização com falta interna, permite verificar que quando o transformador é energizado com a falta interna os valores de  $th_{d1}$  brevemente se tornam maiores que  $th_{d3}$ , e assim, a condição de falta interna é corretamente identificada.

Figura 27 - Variação dos CD do 1º e 3º nível de decomposição para a condição de energização com falta interna em 10% dos enrolamento da fase A do primário, e sinal de decisão do método.

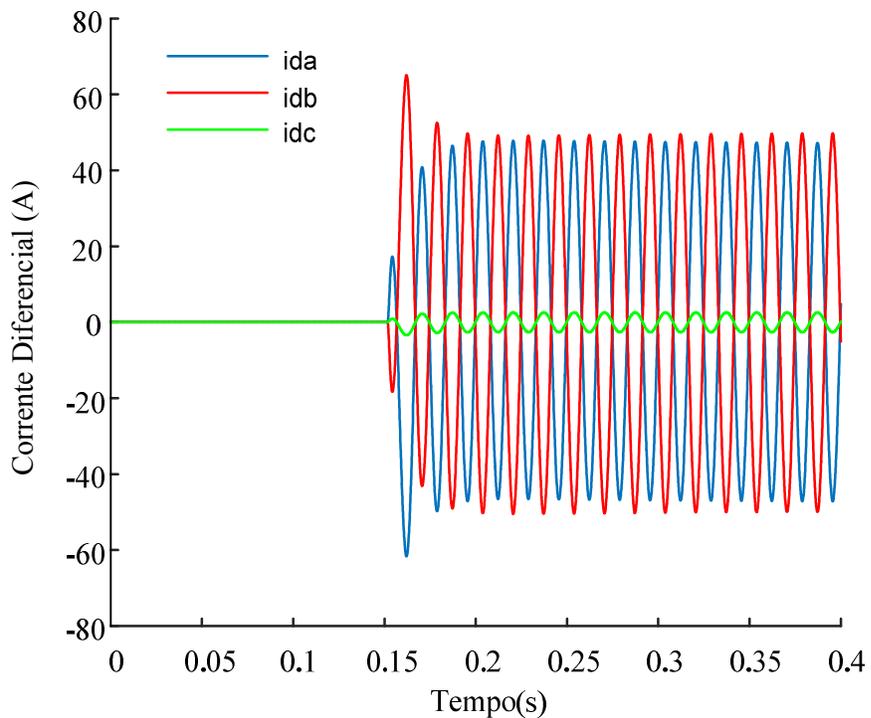


Fonte: produzida pelo autor.

### 7.3.2 Falta interna

Nos testes de falta interna, considerou-se que o transformador já estava em funcionamento, ou seja, sem o transitório de *inrush*, quando em determinado instante ocorre uma falta interna. Na condição apresentada na Figura 28, foi realizada uma falta interna em 5% dos enrolamentos da fase A e terra do lado primário do transformador, com ângulo de incidência de falta de 90°.

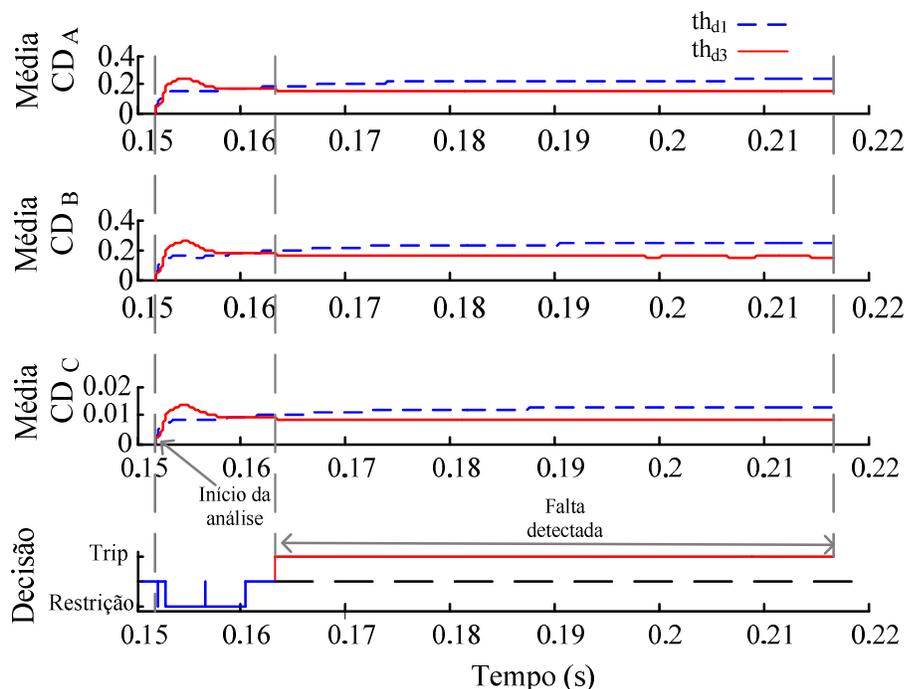
Figura 28 - Correntes diferenciais para condição de falta interna em 5% dos enrolamentos da fase A-T do primário, ângulo de incidência de 90°.



Fonte: produzida pelo autor.

Como pode ser visto na Figura 29, no instante inicial quando a falta é aplicada a variação de  $th_{d3}$  permanece maior que  $th_{d1}$ , e em aproximadamente 12 ms depois o  $th_{d1}$  torna-se maior que  $th_{d3}$  caracterizando a condição de falta interna. Esta condição é devido ao tipo de falta envolver uma porcentagem pequena de enrolamentos da fase do transformador, tornando-a de difícil identificação.

Figura 29 - Variação dos CD do 1º e 3º nível de decomposição para a condição de falta interna em 5% dos enrolamento da fase A do primário, e sinal de decisão do método.



Fonte: produzida pelo autor.

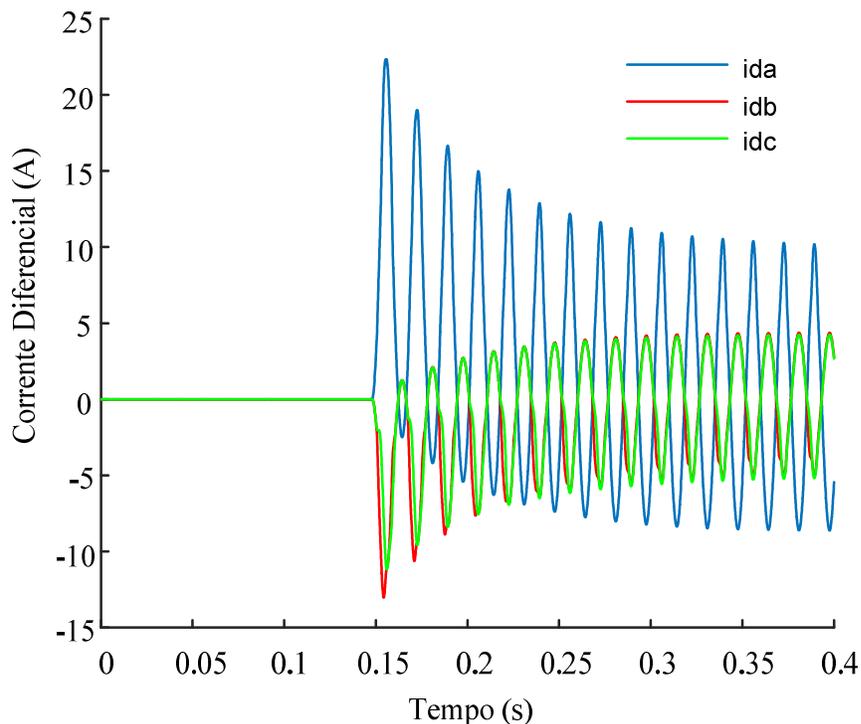
### 7.3.3 Falta interna entre espiras (turn-to-turn)

Um tipo de curto-circuito em que os transformadores de potência estão sujeitos durante sua operação e que é responsável por 70% - 80% das falhas em transformadores (KULKANI e KHAPARDE, 2005) são as condições de faltas entre espiras do mesmo enrolamento. Esse tipo de falta é causado pela degradação da isolamento do enrolamento a efeitos térmicos, elétricos, e desgastes mecânicos (SHAH e BHALJA, 2013). Se esse tipo de falta não for detectado rapidamente, maiores danos ao transformador de força são esperados, já que um arco elétrico pode se formar dentro do tanque do transformador. O esquema de proteção tradicional é capaz de identificar esses tipos de faltas, mas a detecção é lenta e pode piorar a condição de falta entre as espiras (SHAH e BHALJA, 2013).

Para exemplificar esta condição de falta, a Figura 30 apresenta as correntes diferenciais durante uma falta interna entre 5% e 10% das espiras do enrolamento da fase A

do lado secundário do transformador, quando este estava sendo energizado em um ângulo de  $0^\circ$ .

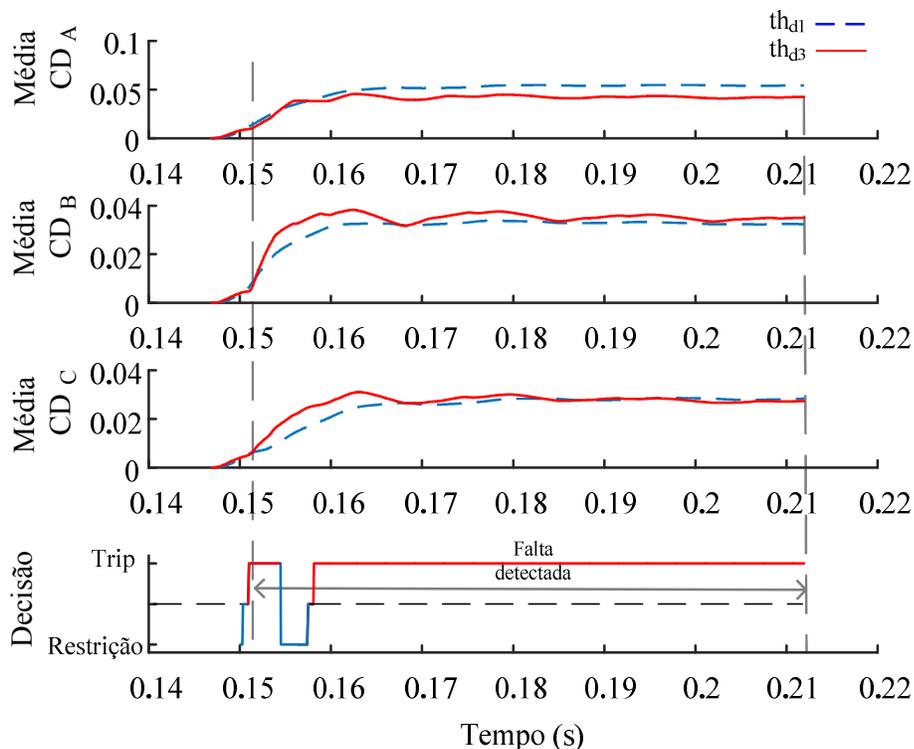
Figura 30 - Correntes diferenciais para condição de energização com falta interna entre 5% e 10% dos enrolamentos da fase A do secundário, ângulo de incidência de  $0^\circ$ .



Fonte: produzida pelo autor.

Observando a Figura 31, nota-se que logo no início da condição de falta entre as espiras, há uma súbita elevação dos valores de  $th_{d1}$  nas fases. Porém, nota-se ainda que em um curto período de tempo, os valores de  $th_{d1}$  tornam-se menores que  $th_{d3}$  nas fases B e C. No entanto, para a identificação de uma falta interna, a metodologia de proteção proposta necessita que apenas em uma das fases a condição de  $th_{d1} > th_{d3}$  seja satisfeita.

Figura 31 - Variação dos CD do 1º e 3º nível de decomposição para a condição de energização com falta interna entre 5% e 10% dos enrolamento da fase A do secundário, e sinal de decisão do método.

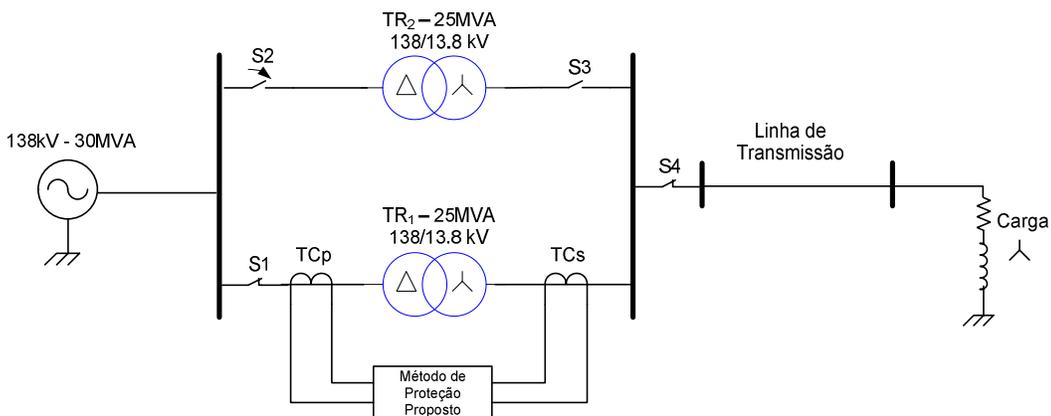


Fonte: produzida pelo autor.

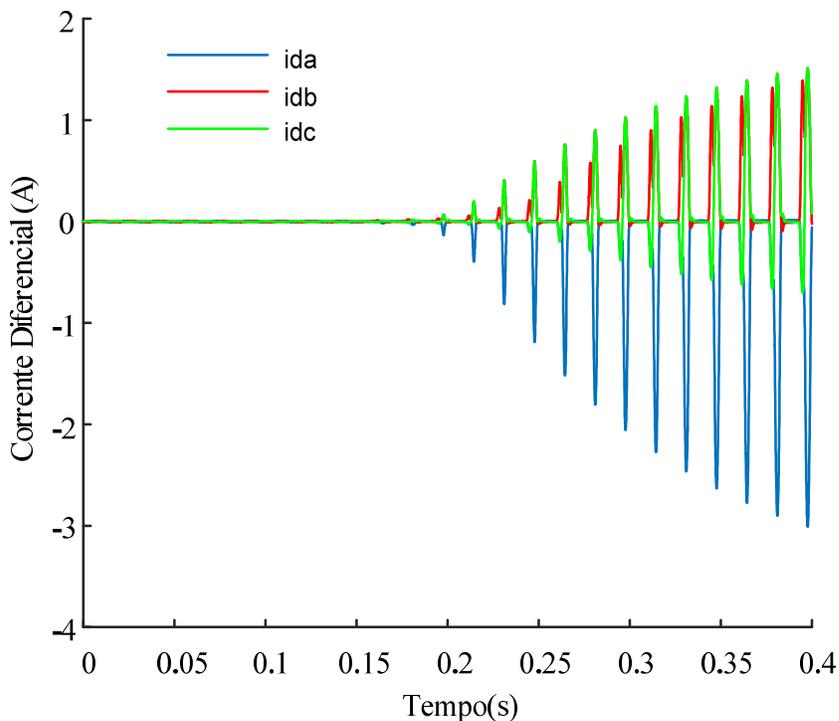
#### 7.4 ENERGIZAÇÃO SOLIDÁRIA (“*SYMPATHETIC INRUSH*”)

Nas condições de energização solidária (*sympathetic inrush*) testadas, foram considerados os transformadores TR<sub>1</sub> e TR<sub>2</sub> em paralelo, com TR<sub>2</sub> desconectado da carga (S<sub>3</sub> aberta), e o transformador TR<sub>1</sub> já energizado, quando no instante t = 0,15s a chave S<sub>2</sub> é fechada iniciando a energização do TR<sub>2</sub>, Figura 32. A Figura 33 apresenta o comportamento das correntes diferenciais do transformador TR<sub>1</sub> devido à energização de TR<sub>2</sub>.

Figura 32 - Circuito de simulação da energização solidária.



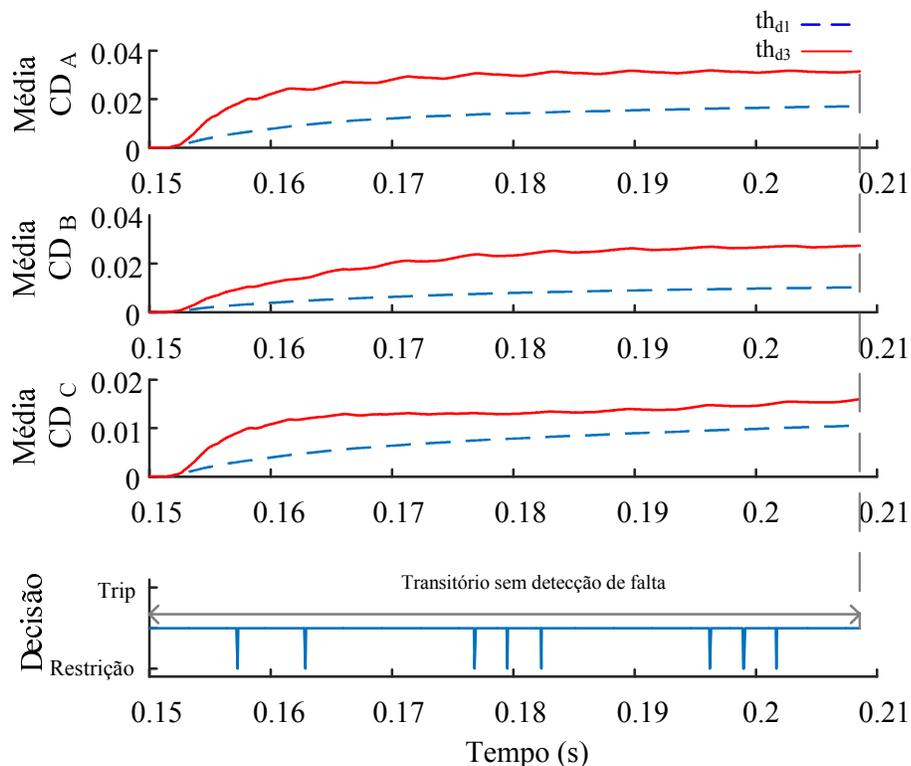
Fonte: produzida pelo autor.

Figura 33 - Correntes diferenciais do TR<sub>1</sub> durante a condição de energização solidária.

Fonte: produzida pelo autor.

A Figura 34 permite verificar que a partir que as correntes diferenciais do TR<sub>1</sub> começam a ser afetadas pela energização do TR<sub>2</sub>, os valores de  $th_{d1}$  mantêm-se menores que  $th_{d3}$  e que, conforme o gráfico de Decisão, em diversos momentos o método restringiu a operação do relé de proteção, identificando a situação de energização solidária como uma condição não danosa ao transformador, mantendo-o em funcionamento.

Figura 34 - Variação dos CD do 1º e 3º nível de decomposição para a condição de energização solidária, e sinal de decisão do método.

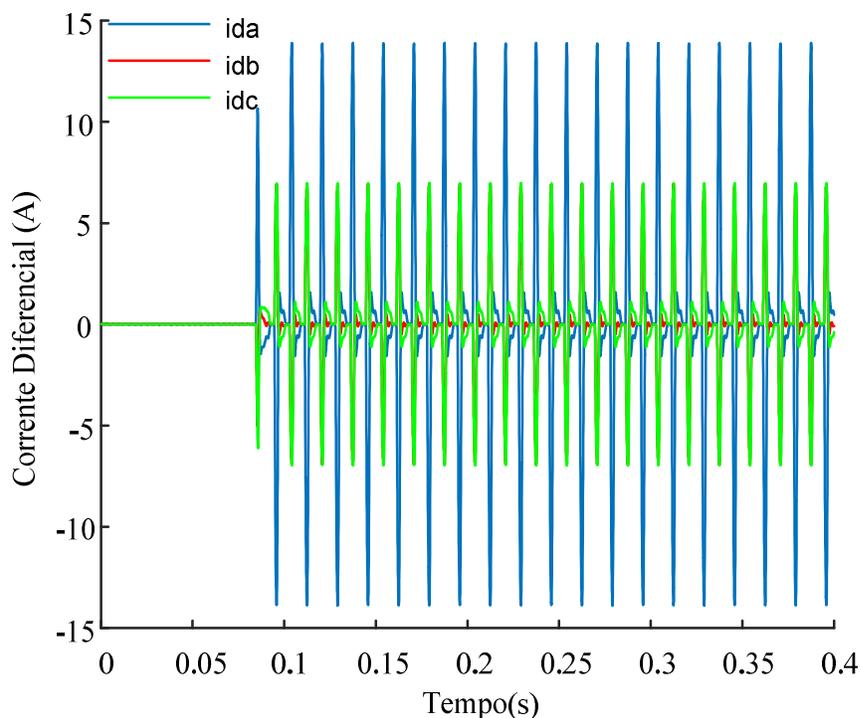


Fonte: produzida pelo autor.

## 7.5 FALTA EXTERNA

Foram considerados casos de faltas próximas ao TC do lado secundário do transformador e na linha de distribuição, próximo a carga. Para sumarizar as condições testadas, a Figura 35 apresenta as correntes diferenciais para uma condição de falta externa próximo ao TC, fora da região protegida. Nesta condição, foi aplicada uma falta envolvendo as fases ABC, considerando uma resistência de falta de  $0,1\Omega$ , acarretando na saturação do TC secundário.

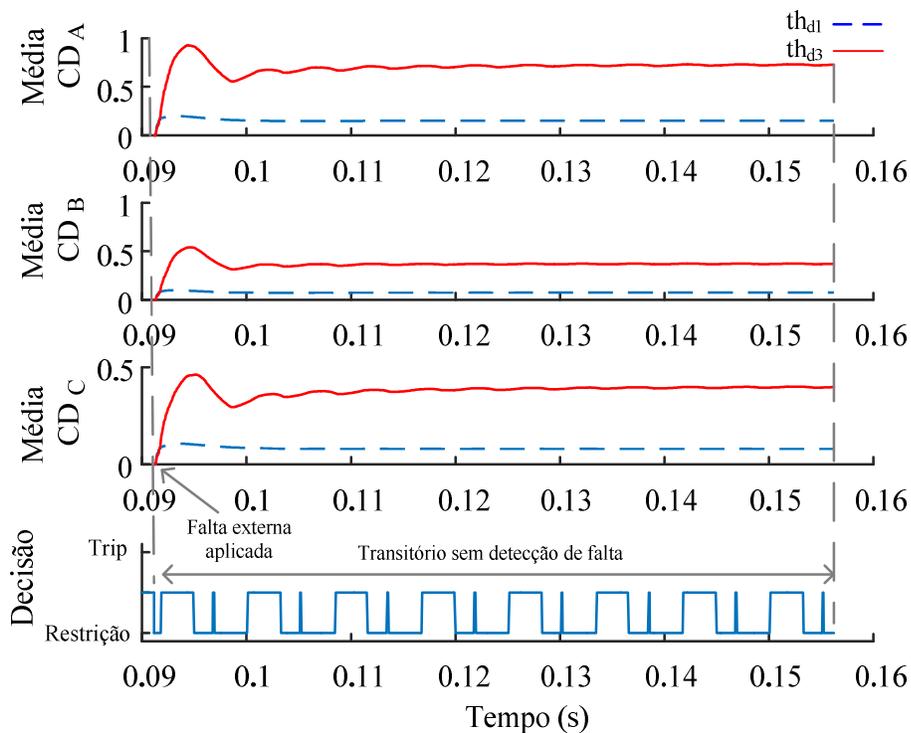
Figura 35 - Correntes diferenciais para condição de falta externa próximo ao TC secundário nas fases ABC.



Fonte: produzida pelo autor.

No resultado obtido para essa simulação, permite verificar que os valores de  $th_{d1}$  se mantiveram menores que os de  $th_{d3}$ , Figura 36, também é notado que durante o período da falta externa, diversos sinais de restrição foram enviados para o relé de proteção. Isto significa que a condição do bloco 2 ( $i_d \geq i_{pk}$ ) foi satisfeito e iniciado a decomposição das correntes diferenciais pela TWD no bloco 3 e discriminação do transitório no bloco 4. Como a condição simulada não foi identificada como uma condição de falta interna, a metodologia restringiu corretamente a operação do relé de proteção.

Figura 36 - Variação dos CD do 1º e 3º nível de decomposição para a condição de falta externa próximo ao TC secundário, e sinal de decisão do método.

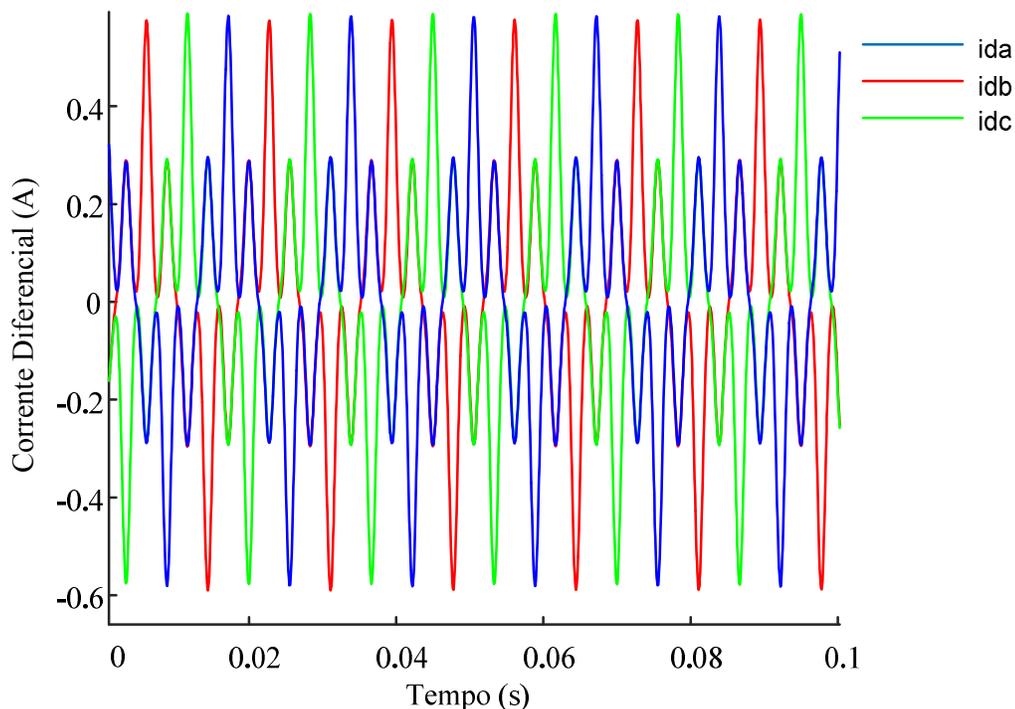


Fonte: produzida pelo autor.

## 7.6 SOBREEXCITAÇÃO

Para testar a metodologia perante a condição de sobreexcitação, o transformador ( $TR_1$ ) do sistema elétrico simulado foi submetido a tensões de 110%, 120%, 130% e 140% da tensão nominal. As chaves  $S_2$  e  $S_3$  foram mantidas abertas para deixar o transformador  $TR_2$  fora de operação. A Figura 37 mostra a característica do formato de onda das correntes diferenciais para uma situação em que o transformador é submetido a uma tensão de 120% referente a tensão nominal.

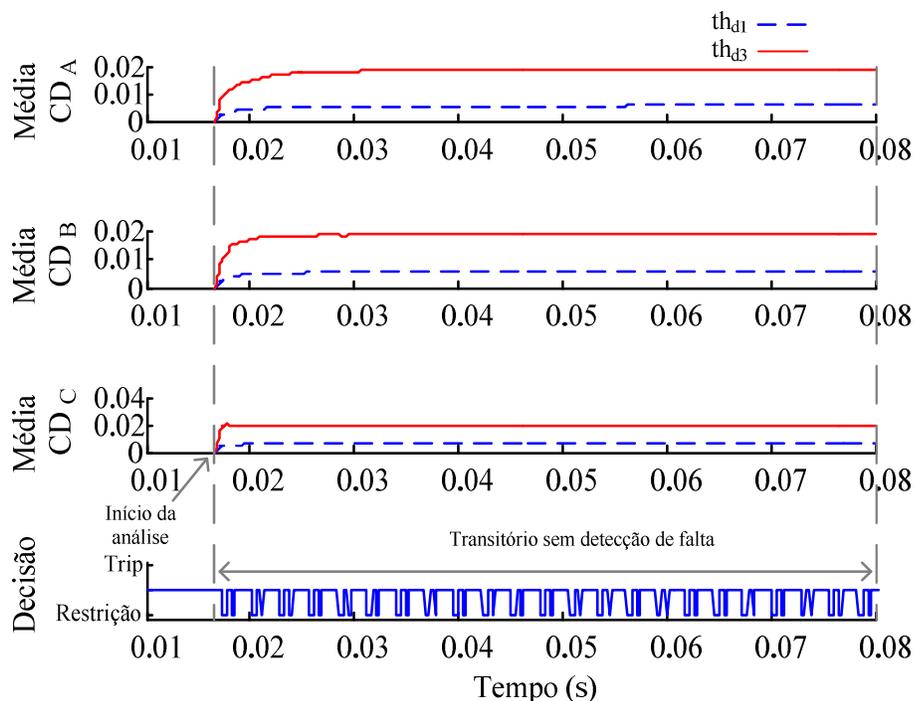
Figura 37 - Correntes diferenciais para condição de sobre-excitação de 120%.



Fonte: produzida pelo autor.

A distorção das correntes diferenciais apresentadas durante a condição de sobreexcitação do transformador, sensibilizou o bloco 2 da metodologia ( $i_D \geq i_{pk}$ ) e ativou o bloco 3 e 4 para identificação e discriminação do transitório. Conforme mostra a Figura 38, o  $th_{d1}$  manteve-se menor que  $th_{d3}$  durante toda a análise das correntes diferenciais do transitório de sobreexcitação, mantendo o transformador em operação. No gráfico de decisão, é possível notar que a metodologia restringiu por diversas vezes corretamente o transitório sob análise, evitando uma operação indevida.

Figura 38 - Variação dos CD do 1º e 3º nível de decomposição para a condição de sobreexcitação de 120%, e sinal de decisão do método.



Fonte: produzida pelo autor.

## 7.7 OUTROS DISTÚRBIOS

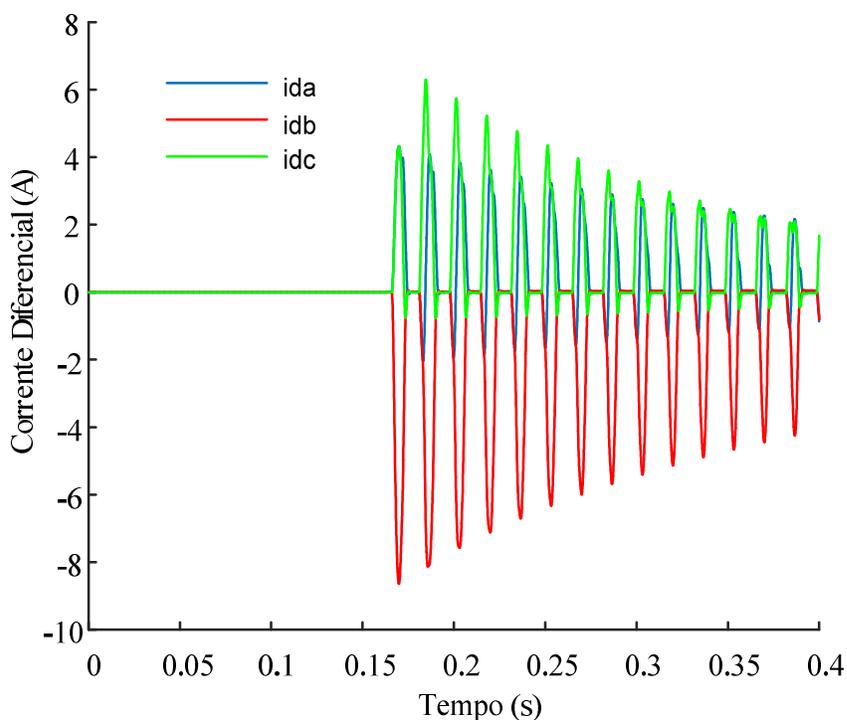
### 7.7.1 Erro na relação de transformação dos tcs

Nos testes realizados para a condição de erro na relação de transformação dos TC's do lado primário e secundário, foram considerados erros de 10% a 80% (passo de 10%) no respectivo TC analisado. Nas simulações considerou-se que o transformador estava operando em regime permanente. Durante os testes observou-se que o bloco 3 da metodologia proposta não foi ativado, ou seja, os erros nos TC's não foram suficientes para sensibilizar e satisfazer a condição do bloco 2 ( $i_D \geq i_{pk}$ ).

### 7.7.2 Energização com discordância de fases

Nos testes realizados para a condição de energização com discordância de fases, foi considerado que as fases foram energizadas com uma diferença de tempo de 10 ms entre si. Por exemplo, a Figura 39 apresenta a corrente diferencial para uma energização com discordância de fases, ângulo de  $60^\circ$ . A fase A foi energizada no instante  $t = 0,15$  s, fase B em  $t = 0,16$  s, e fase C em  $t = 0,17$  s.

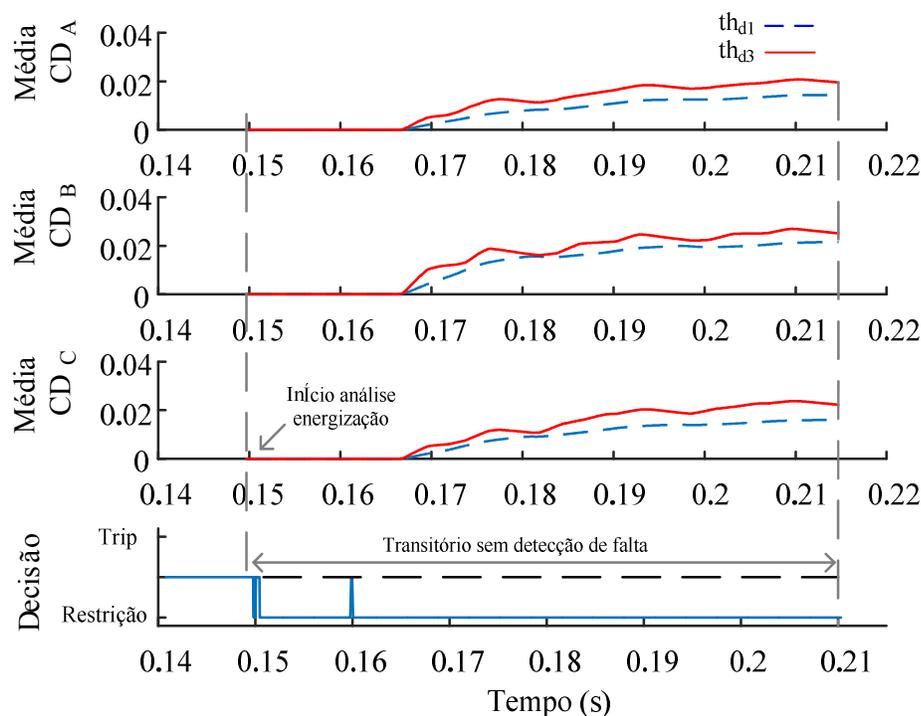
Figura 39 - Correntes diferenciais durante a condição de energização com discordância de fases.



Fonte: produzida pelo autor.

Durante a ocorrência da energização com discordância de fases o método restringiu a operação do relé de proteção corretamente, como pode ser visto na Figura 40, no gráfico de Decisão, e também os valores de  $th_{d1}$  mantiveram-se menores que  $th_{d3}$ .

Figura 40 - Variação dos CD do 1º e 3º nível de decomposição para a condição de energização com discordância de fases, e sinal de decisão do método.



Fonte: produzida pelo autor.

## 7.8 COMPARAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA COM MÉTODOS PRESENTES NO ESTADO DA ARTE

Diversos trabalhos com metodologias para aperfeiçoar a proteção de transformadores de potência já foram propostos pelos pesquisadores da área. Como mencionado anteriormente, o método convencional para a proteção de transformadores, e mais comumente utilizado, é o diferencial percentual com restrição por harmônicos (XIANGNING et al., 2010; HAMILTON, 2013). Este método analisa os níveis da componente harmônica de 2º ordem obtidos pela FFT para discriminar as condições de falta interna e *inrush*. Alguns métodos propostos no estado da arte utilizam a ferramenta matemática TW na proteção de transformadores (EISSA, 2005; MARQUES et al., 2013; OZGONENEL e KARAGOL, 2014; SALEH, et al., 2011). Alguns desses apresentam bons resultados perante as condição de *inrush* e faltas internas. Deste modo, com o intuito de avaliar e comparar o desempenho da metodologia proposta neste trabalho com outros métodos existentes, serão apresentados os resultados obtidos em relação a eficiência na identificação dos transitórios e tempo de

resposta durante as condições de faltas internas. As comparações serão feitas com o método convencional (FFT) e o método que utiliza a TWD com limiar adaptativo proposto por Oliveira et al (2014).

No método convencional (FFT) implementado utilizou-se o monitoramento dos níveis da componente harmônica de 2º ordem para a discriminação das condições de faltas internas e *inrush*. Normalmente, a relação com a componente fundamental usada é de 15 a 35% para o relé de proteção. Neste trabalho utilizou-se um limiar de 15% para a identificação dos transitórios pelo método convencional.

Já o método proposto por Oliveira et al (2014), utiliza a variação dos coeficiente de energia espectral obtidos pela TWD para a identificação dos transitórios ocorridos no transformador. Um índice de restrição ( $R_{ind}$ ) é calculado para quantificar a magnitude relativa dos sinais de detalhes do 1º nível ( $D_1$ ), e então definida uma relação entre o máximo valor do coeficiente de detalhe  $D_1$  e a energia espectral da wavelet. O índice  $R_{ind}$  é dado por:

$$R_{ind} = \frac{d_{max.D1}}{\sum_{c=1}^M |d_{(c)}|^2 \Delta t} \quad (27)$$

Onde  $d_{max.D1}$  é o máximo coeficiente de detalhe do 1º nível ( $D_1$ ),  $M$  o número total de coeficientes wavelet de  $D_1$  e  $\Delta t$  é a período de amostragem. A equação no denominador da equação (26) representa o cálculo da energia espectral da wavelet.

Para a discriminação dos transitórios é feita uma comparação entre o índice  $R_{ind}$  com o valor do limiar ( $Th$ ). No trabalho, os autores propuseram um limiar adaptativo que depende do comportamento das correntes diferenciais, dado por.

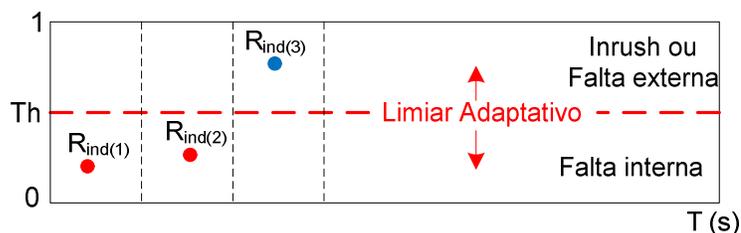
$$Th = k_1 * |(i_{2p} - i_{2s})| \quad (28)$$

Onde  $k_1$  representa a sensibilidade característica e é um valor percentual fixo,  $i_{2p}$  e  $i_{2s}$  são as correntes instantâneas do primário e secundário, respectivamente.

Por exemplo, transitórios que geram pequenas correntes diferenciais, como faltas externas, diminuem o valor do limiar adaptativo, aumentando a zona de restrição do relé. Já condições de faltas internas que possuem altas correntes diferenciais, aumentam a zona de *trip* do relé. No método proposto pelos autores, uma condição de falta interna é identificada

quando pelo menos dois de três valores de  $R_{ind}$  são menores que o limiar adaptativo  $Th$ . A Figura 41 ilustra o comportamento do limiar adaptativo proposto pelos autores.

Figura 41 - Limiar adaptativo do método de Oliveira et al(2014).



Fonte: Adaptado de (OLIVEIRA, 2014).

Sendo assim, esse método foi escolhido para comparação por também utilizar a TWD para a proteção de transformadores, e por ter proposto um limiar adaptativo para a identificação dos transitórios.

A Tabela 10 apresenta algumas das características de implementação dos métodos, tais como frequência da amostragem e tipo de limiar utilizado para a identificação dos transitórios.

Tabela 10 - Características dos métodos comparados.

Método	Mét. Prop	TM (FFT)	Mét. Adapt
Frequência (kHz)	15,36	15,36	25
Limiar	Não	Sim	Sim (adaptativo)

### 7.8.1 Análise de tempo dos métodos

A análise de tempo busca avaliar o tempo de resposta dos métodos quando o transformador foi submetido as diversas condições de faltas internas testadas nas simulações. O tempo de resposta é um fator crucial para a proteção de transformadores, pois quanto menor o tempo em que o equipamento é mantido sob os efeitos do curto-circuito, menores serão os danos ao equipamento e ao SEP.

*Capítulo 7 – Resultados e Discussões*

A Tabela 11 apresenta um resumo dos diferentes tipos de faltas internas que foram utilizados para testar e comparar as metodologias aplicadas para proteção do transformador, assim como os tempos de resposta para tais condições.

Tabela 11 - Análise de tempo das condições de faltas internas testadas.

Estudo de caso	Caso	Enrolamento	Tipo de falta	Porcentagem do enrolamento (%)	ângulo de incidência (°)	Resistência de falta ( $\Omega$ )	Trip (ms)		
							Mét. Prop.	FFT	Mét. Adap.
1	FI	primário	A-g	5	0	-	17,8	16,8	restrição
2	FI	primário	A-g	10	0	-	13,5	15	23,5
3	FI	primário	A-g	80	45	-	13,5	15,1	25
4	FI	secundário	A-g	5	60	-	20,5	restrição	restrição
5	FI	secundário	A-g	10	0	-	21,3	82,3	restrição
6	FI	secundário	A-g	50	90	-	17,9	17,8	restrição
7	FI	primário	AB-g	10	60	0.1	17,5	16,7	17,9
8	FI	primário	AB-g	10	45	10	17,5	16,7	17,9
9	FI	primário	AB-g	10	0	100	17,5	16,8	27,3
10	FI	secundário	AB-g	10	0	0,1	17,9	18,5	restrição
11	FI	secundário	AB-g	10	0	10	restrição	restrição	restrição
12	FI	secundário	AB-g	10	0	100	restrição	restrição	restrição
13	FI	primário	AB	5	60	-	17,7	16,7	17,7
14	FI	primário	AB	50	90	-	13,4	14,9	17,3
15	FI	primário	AB	80	0	-	13,4	14,9	21
16	FI	secundário	AB	10	0	-	17,7	18,1	restrição
17	FI	primário	ABC	5	45	-	17,4	16,7	18,6
18	FI	secundário	ABC	5	45	-	14,6	17,5	restrição
19	FI	secundário	ABC	10	60	-	17,7	17	25,8
20	FI	secundário	ABC	80	90	-	17,6	16,8	20,1
21	EFI	primário	A-g	5	90	-	17,5	32,7	restrição
22	EFI	secundário	A-g	5	90	-	19,7	restrição	restrição
23	EFI	primário	AB	10	0	-	18,5	33,8	18,8
24	EFI	secundário	AB	5	45	-	17,4	restrição	restrição
25	EFI	primário	AB-g	50	60	0,1	17,4	32,7	17,9
26	EFI	secundário	AB-g	80	90	10	17,4	32,7	restrição
27	EFI	primário	ABC	5	0	-	17,4	31,6	18,6
28	EFI	primário	ABC	10	45	-	17,4	31,6	18,6
29	ETT	primário	A	5-10	0	-	16,7	21,1	26,1
30	ETT	primário	A	10-50	0	-	17,4	16,7	16,8
31	ETT	primário	A	50-80	45	-	20,4	17,7	16,8
32	ETT	secundário	A	10-50	90	-	17,0	16,9	16,8

(continuação)

Estudo de caso	Caso	Enrolamento	Tipo de falta	Porcentagem do enrolamento (%)	ângulo de incidência (°)	Resistência de falta ( $\Omega$ )	Trip (ms)		
							Mét. Prop.	FFT	Mét. Adap.
34	TT	primário	A	10-80	45	-	18,7	17	19,5
35	TT	primário	A	50-80	45	-	20,4	17,4	20,4
36	TT	secundário	A	10-50	90	-	17,0	17,8	25,1

FI= Falta Interna; EFI= Energ. com Falta Interna; ETT= Energ. com falta Turn-to-Turn; TT= falta Turn-to-Turn

Os resultados da Tabela 11 mostram que em média os tempos de identificação das condições de faltas foram semelhantes e satisfatórios. As condições que apresentaram uma diferença de tempo mais significativa entre o método proposto e o da FFT foram os casos em que a falta interna envolvia uma pequena porcentagem das espiras (estudo de caso 5, 21 e 23), atingindo uma diferença de 61 ms no tempo de identificação da falta. Já entre o método proposto e o método adaptativo, a maior diferença de tempo para identificação da falta foi de 11,5 ms, apresentando também uma maior diferença de tempo em condições de falta em porcentagens menores de espiras (estudo de caso 2, 9 e 29). Nota-se ainda que durante diversas condições de faltas internas os métodos da FFT e o adaptativo restringiram a operação do relé de proteção, principalmente quando a falta envolvia poucas espiras do secundário do transformador (estudo de caso 4, 22 e 24). Nos estudos de caso 11 e 12 os três métodos restringiram a operação do relé de proteção, atuando de maneira incorreta durante a condição de falta interna. Ao analisar esses dois casos é possível perceber a influência da resistência de falta na correta identificação, pois para a mesma condição de falta com uma resistência menor (estudo de caso 10) o método proposto e o da FFT identificaram corretamente a condição.

A Tabela 12 mostra a comparação do tempo médio de identificação dos métodos para os tipos de faltas internas testadas.

Tabela 12 - Tempo médio (ms) de resposta dos métodos para as diferentes condições de faltas internas simuladas.

Casos	Tipo de falta											
	A			AB-g			AB			ABC		
	Mét. Prop	FFT	Mét. Adap	Mét. Prop	FFT	Mét. Adap	Mét. Prop	FFT	Mét. Adap	Mét. Prop	FFT	Mét. Adap
FI	15,3	22,5	25	17,5	17,2	21	15,9	16,2	18,2	17,1	16,9	21
EFI	18,6	31,9	30,8	22,4	32,7	21	17,8	30,1	17,9	17,4	32,7	18,6
TT	18,65	33,2	19,87	-	-		-	-	-	-	-	-

O método proposto apresentou um tempo médio (considerando todos os conjuntos e tipos de faltas) de 17,85 ms, enquanto que o método convencional (FFT) apresentou um tempo médio de 25,93 ms, e o método adaptativo um tempo de 21,48 ms. Comparando os tempos apresentados pelos métodos, o método proposto mostrou-se 31,16% mais rápido na identificação das condições de faltas internas que o método convencional, e 16,9% mais rápido que o método adaptativo.

### 7.8.2 Comparativo da confiabilidade dos métodos

A Tabela 13 compara o desempenho dos métodos perante as condições simuladas no sistema elétrico testado. Para o método adaptativo são apresentados os resultados encontrados no artigo e os da implementação do método de Oliveira et al (2014). Dos resultados do método adaptativo, nota-se uma diferença significativa entre a eficiência apresentada durante as condições de energização com falta interna (EFI) e falta interna (FI). Tal situação, provavelmente, justifica-se devido a não especificação do valor da sensibilidade característica ( $k_I$ ) utilizado, e também pelo número de testes realizados pelo autor do método, onde as condições de faltas internas somam um total de 1520 casos. Para a implementação do método, foram realizados testes com diferentes valores para  $k_I$  ( $k_I = 0,1$ ;  $k_I = 0,3$ ;  $k_I = 0,5$ ), e apresentado a média dos resultados encontrados. O método adaptativo implementado foi submetido a testes que não haviam sido realizados e apresentou uma boa eficiência perante tais condições.

Tabela 13 - Comparação de desempenho dos métodos.

Casos	Método			
	Mét.Adap		FFT	Mét.Prop
	*	**		
E	97,7	91,18	96	100
EFI	97,8	62,5	95,8	100
FI	99,2	57,3	96,3	99,7
TT	NT	98,9	100	100
FE	99,5	100	89	100
ESOL	NT	100	100	100
Sobre_Exc	NT	100	25	100
Erro TC	NT	100	33,3	100
<b>Eficiência média total (%)</b>	<b>98,55</b>	<b>88,74</b>	<b>79,43</b>	<b>99,96</b>

FE= Falta Externa; ESOL= Energ. Solidária; Sobre\_Exc= Sobreexcitação; NT= Não testado

\*Resultados apresentados em Oliveira et al(2014), considerando a wavelet mãe Daubechies (db4);

\*\*Resultados apresentados na implementação do método.

De modo geral, os métodos proposto e adaptativo apresentaram uma eficiência melhor que o método convencional (FFT) perante as condições simuladas. O método proposto mostrou-se eficiente na identificação das condições de faltas internas, confiável e robusto durante as condições não faltosas, atingindo uma eficiência de 99,96% nos testes realizados.

## 7.9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para se validar uma metodologia de proteção deve-se prever uma grande quantidade de casos e perturbação ao qual o SEP está sujeito. Conforme apresentado nos resultados, os métodos testados foram submetidos a diferentes condições de distúrbios para avaliar sua eficiência e robustez. Os resultados mostram que a metodologia proposta mostrou-se eficiente, robusta e rápida na discriminação das condições de faltas internas simuladas, quando comparada com o método adaptativo e o convencional (FFT). Sendo assim, a metodologia proposta mostra-se promissora para a aplicação na proteção de transformadores de potência.

## **8 CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS**

### **8.1 CONCLUSÕES**

Este trabalho teve como objetivo principal o desenvolvimento de uma metodologia para a identificação e classificação das diversas condições transitórias em que os transformadores de potência estão sujeitos, focando principalmente nas condições de faltas internas e correntes transitórias de magnetização (*inrush*). O método baseou-se na análise e monitoramento da variação dos Coeficientes de Detalhes (CD) provenientes da decomposição das correntes diferenciais pela TWD. A partir das características extraídas dos CD, a metodologia proposta foi capaz de identificar e discriminar os distúrbios elétricos simulados sem a necessidade de configuração de um limiar de atuação. Tal objetivo foi alcançado, conforme mostram os resultados, devido que em condições de faltas internas os CD do 1º nível de decomposição apresentam uma súbita variação com amplitude constante, com valores maiores que os CD do 3º nível de decomposição. Já para os transitórios como correntes de *inrush*, faltas externas, sobreexcitação, etc, um comportamento oposto foi observado. A metodologia proposta ainda foi comparada com dois métodos presentes no estado da arte, o método convencional (FFT) e um método adaptativo proposto por Oliveira et al (2014). Na análise de tempo, a metodologia proposta mostrou-se 31,16% e 16,9% mais rápida na identificação das condições de faltas internas que o método convencional e o método adaptativo, respectivamente. Em relação à eficiência na identificação das condições simuladas, em geral, os métodos mostraram-se eficientes na identificação dos transitórios, sendo que a metodologia proposta atingiu uma eficiência de 99,96%. Destaca-se que tanto o método convencional quanto o adaptativo, falharam na identificação de algumas condições que não são curtos-circuitos, como energização e faltas externas. Tais condições comprometem a confiabilidade no sistema de proteção do transformador, já que o critério de segurança é violado. Os resultados mostram que a metodologia proposta apresenta as seguintes características e contribuições: i) eliminou a necessidade de configuração de um limiar de atuação; ii) identificação rápida das condições de faltas internas quando comparada com os métodos implementados; iii) alta eficiência na identificação dos distúrbios elétricos testados (99,96%); iv) segura e robusta durante transitórios sem curto-circuito interno; v) implementação simples. Diante do exposto, pode-se afirmar que a metodologia proposta é

confiável e adequada com os requisitos exigidos em aplicações reais de proteção em transformadores de potência.

## **8.2 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS**

Para trabalhos futuros na área, são apresentadas as seguintes sugestões:

- Realizar testes para diferentes conexões do transformador, tais como:  $\Delta$ - $\Delta$  e Y-Y;
- Realizar testes com outros tipos de modelos de transformadores, tais como BCTRAN, híbrido, etc. A modelagem dos transformadores são importantes para a obtenção de dados de simulação mais próximo dos equipamentos reais;
- Realizar testes para rejeição de carga e inserção de ruídos no sinal;
- Implementar e comparar com outros métodos presentes no estado da arte, com o intuito de avaliar o tempo de atuação e confiabilidade durante os transitórios em que os transformadores estão sujeitos;
- Testar a metodologia com dados reais de operação de um transformador de potência;
- Estudar e avaliar outros softwares para faltas internas em transformadores. Existem diferentes softwares de simulação de SEP que podem apresentar diferentes métodos de cálculo e precisão durante a sua simulação, e com isso acarretar em resultados distintos para um mesmo caso simulado.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADDISON, P. S. **The Illustrated Wavelet Transform Handbook: Introductory Theory and Applications in Science, Engineering, Medicine and Finance**. Institute of Physics Publishing. ISBN 0-7503-0692-0, 2002.

ALENCAR, R. J. N. **Identificação de correntes de inrush na proteção diferencial de transformadores de potência através do gradiente da corrente diferencial e de mapas auto-organizáveis**. Tese de Doutorado. UFPA, Belém-PA, 2013.

ALENCAR R. J. N, BEZERRA U. H, **Power Transformer Differential Protection Through Gradient of the Differential Current**. *Journal of Control, Automation and Electrical System*, v.24, p.162-173, 2013.

AHMADI M., SAMET H., GHANBARI T. **Discrimination of internal fault from magnetising inrush current in power transformers based on sine-wave least-squares curve fitting method**. *IET Science, Measurement and Technology*, 2015, vol. 9, Iss. 1, pp. 73-84.

ANDERSON, P. M. **Power System Protection**. New York: IEEE Press, McGraw Hill, 1999. ISBN: 0-7803-3427-2.

ASHRAFIAN A., ROSTAMI M., GHAREHPETIAN G. B., **Hyperbolic S-transform-based method for classification of external faults, incipient faults, inrush currents and internal faults in power transformer**. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2012, vol. 6, Iss. 10, pp. 940-950.

ATP. **Alternative Transients Program – Rule Book**. Leuven EMTP Center (LEC), 1987.

BARAN, M. e KIM, J. **A Classifier for Distribution Feeder Overcurrent Analysis**. *IEEE Transactionson Power Delivery*, 21(1), 456-462, 2006.

BAOMING, G., ALMEIDA, A. T., QIONGLIN, Z e XIANGHENG, W. **An Equivalent Instantaneous Inductance-Based Technique for Discrimination Between Inrush Current and Internal Faults in Power Transformers**. *IEEE Transactionson Power Delivery*, 21(1), 456-462, 2006.

BARBOSA D. **Sistema híbrido ineligente para o monitoramento e proteção de transformadores de potência**. Tese de Doutorado, USP-São Carlos, Brasil, 2010.

BEHRENDT, K., FISCHER, N., LABUSCHAGNE, C. **Considerations for using harmonic blocking and harmonic restraint techniques on transformer differential relays**. *Journal of Reliable Power*, v. 2, n. 3, p. 36-52, 2011.

BERNARDES A. P. **Esquema Completo de Proteção Diferencial de Transformadores para Testes em um Relé Digital**. Dissertação de Mestrado, USP, 2006.

BLACKBURN, J. T. e DOMIN, T. J. **Protective Relaying: Principles and Applications**. 3<sup>a</sup> ed, Boca Raton, Florida: CRC Press.

BRANCO, H. M. G. C. **Uma Estratégica para a Detecção e Classificação de Transitórios em Transformadores de Potência pela Utilização da Transformada Wavelet e da Lógica Fuzzy**. Dissertação de Mestrado, USP-São Carlos, Brasil, 2009.

BRONZEADO, H. S, BROGAN P. B. e YACAMINI R. **Harmonic Analysis of Transient Currents During Sympathetic Interaction**. *IEEE Proceedings on Science, Measurement and Technology*, 142(4), 323-329.

Canadian/American EMTP User Group (1987). **Alternative Transients Program Rule Book**. 1987-1995.

COURY, D. V., OLESKOVICZ, M., e GIOVANINI, R. **Proteção Digital de Sistemas Elétricos de Potência: dos Relés Eletromecânicos aos Microprocessados Inteligentes**. São Carlos: Universidade de São Paulo. ISBN: 978-85-85205-78-2.

DAUBECHIES I. **The Wavelet Transform, Time-Frequency Localization and Signal Analysis**. *IEEE Transaction on Information Theory*, New York, NY, USA. v.36, n.5, p. 961-1005, 1992.

DEBNATH, L. **Wavelet transform & their applications**. Boston: Birkhäuser. ISBN: 0-8176-4204-8, 2002.

EINBALL, C. H., LINDERS, J. R. **A three-phase differential relay for transformer protection**. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. 94, n. 6, p. 1971-1980, 1975.

EISSA, M. M. **A Novel Digital Directional Transformer Protection Technique Based on Wavelet Packet**. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 20, n° 3, July 2005.

GUZMÁN, A. et al. **A Current-Based Solution for Transformer Differential Protection. Part I: Problem Statement**. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Piscataway, v. 21, n. 8, p. 485-491, 2001.

HAMILTON R. **Analysis of transformer inrush current and comparison of harmonic restraint methods in transformer protection**. *IEEE Transactions Industry Applications*, vol. 49, n° 4, pp. 1890-1899, Jul/Aug. 2013.

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

HOROWITZ S. H., PHADKE A. G. **Power System Relaying**. 2° Ed., Baldock: Research Studies Press Ltd., 1996. 318 p. ISBN: 0-86380-185-4.

IEEE Std C37.110. **IEEE guide for the application of current transformers used for protection relaying purposes**, 2007.

IEEE Std C37.91. **IEEE guide for protection power transformers**. ISBN: 978-0-7381-5389-6, 2008.

JENSEN A., A. la COUR HARBO. **A Ripples in Mathematics: The Discrete Wavelet Transform**. New York: Springer-Verlag, ISBN: 3-540-41662-5, 2000.

- JIALE S., JIAO Z., SONG G e KANG X. **Algorithm to Identify the Excitation Inductance of Power Transformer with wye-delta Connection.** *IET Electric Power Applications*, 2009, vol. 3, No.1, pp. 1-7.
- KASZTENNY, B., ROSOŁOWSKI, E., SAHA, M., e HILLSTRON, B. **A self-organizing fuzzy logic based protective relay - an application to power transformer protection.** *IEEE Transactions on Power Delivery*, 12(3), p.1119-1127, 1997.
- KIM, C. H., AGGARWAL, R. **Wavelet Transform in Power Systems Part 2: examples of application to actual power system transients.** *Power Engineering Journal*, Piscataway, v.15, n. 4, p. 193-202, Aug. 2001.
- KULKARNI, S. V., KHAPARDE, S. A. **Transformer Engineering: design and practice.** New York: Marcel Dekker, 2005. ISBN: 0-8247-5653-3.
- LU Z., TANG W. H., LI T. Y., WU Q. H. **A Morphological Scheme for Inrush Identification in Transformer Protection.** *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol.24, n°2, April. 2009.
- MALLAT, S. **A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation.** *Patter Analysis and Machine Intelligence*, *IEEE Transactions on Power Delivery*,. v. 11, n. 7, p. 674-693, Jul 1989.
- MAMEDE FILHO, J., MAMEDE, D. R. **Proteção de Sistemas Elétricos de Potência.** Ed. LTC, Rio de Janeiro, 2013.
- MAO P. L., AGGARWAL R. K., **A Novel Approach to the Classification of the Transient Phenomena in Power Transformer using Combined Wavelet Transform and Neural Network.** *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol.16, n°4, pp.645-660, Oct. 2001.
- MARQUES, J. P., OLIVEIRA, A., e CARDOSO, G. **Algorithm using Discrete Wavelet Transform to Power Transformers Protection.** *48<sup>th</sup> Universities' Power Engineering Conference*, Dublin, Irlanda, 2013.
- MEDEIROS, R. P. **Proteção Diferencial de Transformadores de Potência Utilizando a Transformada Wavelet.** Dissertação de Mestrado. UFRN, Natal-RN, 2014.
- NARENDRA K., FEDIRCHUK D., ZHANG N., MIDENCE R., PERERA N., SOOD V. **Phase Angle Comparison and Differential Rate of Change Methods used for Differential Protection of Busbars and Transformers.** *IEEE Electrical Power and Energy Conference*, IEEE 2011.
- OLIVEIRA M. O., BRETAS A. S., FERREIRA G. D. **Adaptative Differential Protection of three-phase Power Transformers Based on Transient Signal Analysis.** *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2014, vol. 57, pg 366-374.
- OLIVEIRA M. O. **Proteção Diferencial Adaptativa de Transformadores de Potência Baseada na Análise de Componentes Wavelet.** Tese de Doutorado, UFRGS, 2013.
- OZGONENEL O., KARAGOL S., **Power transformer protection based on decision tree approach.** *IET Electric Power Applications*, 2014a, vol. 8, Iss. 7, pp. 251-256.

OZGONENEL O., KARAGOL S. **Transformer differential protection using wavelet transform.** *Electric Power Systems Research*, Vol. 111, pp. 78-84, June 2014b.

PIHLER, J., GREAR, B., e DOLINAR, D. **Improved operation of power transformer protection using artificial neural network.** *IEEE Transactions on Power Delivery*, 12(3), p. 1128-1136, 1997.

RAHMAN M. A. e JEYASURYA B. **A State-of-the-art Review of Transformer Protection Algorithms.** *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 3, No.2, April 1988.

RAHMATI A., SANAYE-PASAND M. **New Method for Discrimination of Transformers Internal Faults from Magnetizing Inrush Currents using Wavelet Transform.** *Power System Technology and IEEE Power India Conference*, 2008.

SALEH, S. A., SCAPLEN, B., e RAHMAN, M. A. **A New Implementation Method of Wavelet-Packet-Transform Differential Protection for Power Transformers.** *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 47, n° 2, March/April 2011.

SEGATTO, E. C. **Relé Diferencial para Transformadores de Potência Utilizando Ferramentas Inteligentes.** Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2005.

SHAH A. M., BHALJA B. R., **Discrimination Between Internal Faults and Other Disturbances in Transformer Using the Support Vector Machine-Based Protection Scheme.** *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 28, NO 3, July 2013.

SHARP R. L. e GLASSBURN W. E. **A Transformer Differential Relay with Second-Harmonic Restraint.** *AIEE Transactions of Power, Apparatus and Systems, Part III*, Vol 77, Pg 913-918, 1958.

TAVARES M. C. D., **Guia resumido do ATP - Alternative Transient Program.** UNICAMP, Brasil, 2003.

XIANGNING L., JINGGUANG H., LINJUN Z., e BO Z. Q. **Analysis of electromagnetic transient and adaptability of second-harmonic restraint based differential protection of UHV power transformer.** *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 25, n°4, pp. 2299-2307, Oct. 2010.

WU W., JI T., LI M., WU Q. **Using mathematical morphology to discriminate between internal fault and inrush current of transformers.** *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2016, vol. 10, Iss. 1, pp. 73-80.

ZHANG L. L., WU Q. H., JI T. Y. e ZHANG A.Q. **Identification of inrush currents in power transformer based on higher-order statistics.** *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2017, vol. 146, pg 161-169.

## APÊNDICE A

### **Divulgação do trabalho**

Este trabalho resultou nas seguintes publicações:

[1] MARQUES, J. P., LAZARO, C., MORAIS, A. P., and CARDOSO, G. **A reliable setting-free technique for power transformer protection based on wavelet transform.** *Electric Power Systems Research*, 162, p. 161-168, 2018.

[2] MARQUES, J. P., MORAIS, A. P., e CARDOSO, G. **Nova Metodologia para Identificação de Energização Solidária em Transformadores de Potência utilizando Transformada Wavelet.** *IEEE Latin America Transactions*, Vol. 16, issue 4, Abril 2018.

Resumo aceito para publicação:

[3] MARQUES, J. P., LAZARO, C., MORAIS, A. P., and CARDOSO, G. **An intelligent algorithm to avoid mal-operation during sympathetic inrush in power transformers.** *53<sup>rd</sup> International Universities Power Engineering Conference*, Glasgow, Escócia-UK, 2018.



```

C          9999
1.06055811E+00 2.68995372E+01
3.28814356E+00 2.98883747E+01
2.08489263E+01 3.28772122E+01
1.29055289E+02 3.43716309E+01
3.80764491E+02 3.52682821E+01
          9999
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
1TSECA NEUT1          0.0175 1.514 7.967
2TPRA N10TA          .1048 9.083 13.80
3N10TA N50TA          .419236.332 55.20
4N50TA N80TA          .314427.249 41.40
5N80TA TPRC          .209618.166 27.60
C
C segundo transformador
TRANSFORMER TA          TB
1TSECB NEUT1
2TPRB N10TB
3N10TB N50TB
4N50TB N80TB
5N80TB TPRA
C
C terceiro transformador
TRANSFORMER TA          TC
1TSECC NEUT1
2TPRC N10TC
3N10TC N50TC
4N50TC N80TC
5N80TC TPRB
C final da descrição do transformador
C
C Dados referentes ao TC1 - TC do lado primário do Transf. de pot.
C
TRANSFORMER          2.8E-32.6E-2TC1A
C <++++++> Cards punched by support routine on 05-Apr-05 16.21.41 <++++++>
C SATURATION
C C fr Vbase Sbase          tipo out
C 60.0 1.00E-031.00E-06          0
C C 34567890123456789012345678901234567890
C C Irms(pu)          Vrms(pu)
C 0.2000000000E-02          7.00
C 4.0000000000E-03          20.00
C 6.0000000000E-03          35.00
C 7.0000000000E-03          43.00
C 1.0000000000E-02          75.00
C 2.0000000000E-02          200.00
C 2.8000000000E-02          340.00
C 4.0000000000E-02          430.00
C 5.0000000000E-02          470.00
C 8.0000000000E-02          500.00
C 2.0000000000E-01          550.00
C          9999
2.82842712E-03 2.62592259E-02
5.25107738E-03 7.50263597E-02
8.05200092E-03 1.31296129E-01
9.37604273E-03 1.61306673E-01
1.30507689E-02 2.81348849E-01
2.69326991E-02 7.50263597E-01
3.63934345E-02 1.27544811E+00
6.23407710E-02 1.61306673E+00
8.51843969E-02 1.76311945E+00
1.78251034E-01 1.87565899E+00
4.53547317E-01 2.06322489E+00
          9999
C
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
C
1TC1SA NEUT0          1.2 .001 200.

```

```

2CH1A TPRA .0001 .1 5.
C
C segundo transformador - FASE B DO TC LADO PRIMÁRIO DO TRANSF. DE POT. -
TRANSFORMER TC1A TC1B
1TC1SB NEUT0
2CH1B TPRB
C
C terceiro transformador - FASE C DO TC LADO PRIMÁRIO DO TRANSF. DE POT. -
TRANSFORMER TC1A TC1C
1TC1SC NEUT0
2CH1C TPRC
C
C IMPEDÂNCIA no secundário do TC do lado PRIMÁRIO do transf. pot.
TC1SA STC1A 3.00
TC1SB STC1B 3.00
TC1SC STC1C 3.00
C final da descrição do TC lado primário do transf. pot.
C
C Dados referentes ao TC2 - TC do lado de baixa tensao
C
TRANSFORMER 2.8E-32.6E-2TC2A
C <++++++> Cards punched by support routine on 05-Apr-05 16.21.41 <++++++>
C SATURATION
C C fr vbase sbase tipo out
C 60.0 1.00E-031.00E-06 0
C C 345678901234567890123456789012345678901234567890
C C Irms(pu) Vrms(pu)
C 0.2000000000E-02 7.00
C 4.0000000000E-03 20.00
C 6.0000000000E-03 35.00
C 7.0000000000E-03 43.00
C 1.0000000000E-02 75.00
C 2.0000000000E-02 200.00
C 2.8000000000E-02 340.00
C 4.0000000000E-02 430.00
C 5.0000000000E-02 470.00
C 8.0000000000E-02 500.00
C 2.0000000000E-01 550.00
C 9999
2.82842712E-03 2.62592259E-02
5.25107738E-03 7.50263597E-02
8.05200092E-03 1.31296129E-01
9.37604273E-03 1.61306673E-01
1.30507689E-02 2.81348849E-01
2.69326991E-02 7.50263597E-01
3.63934345E-02 1.27544811E+00
6.23407710E-02 1.61306673E+00
8.51843969E-02 1.76311945E+00
1.78251034E-01 1.87565899E+00
4.53547317E-01 2.06322489E+00
9999
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
C
1TC2SA NEUT2 1.2 .001 2000.
2NT1A TSECA .0001 .1 5.
C
C segundo transformador - FASE B DO TC LADO SECUNDÁRIO DO TRANSF. POT. -
TRANSFORMER TC2A TC2B
1TC2SB NEUT2
2NT1B TSECB
C
C terceiro transformador - FASE C DO TC LADO SECUNDÁRIO DO TRANSF. POT. -
TRANSFORMER TC2A TC2C
1TC2SC NEUT2
2NT1C TSECC
C
C IMPEDANCIA no secundário do TC do lado SECUNDÁRIO do transf. pot.
TC2SA STC2A 3.00

```

```

TC2SB STC2B          3.00
TC2SC STC2C          3.00
C final da descrição do TC lado secundário do transf. pot.
C
BLANK card terminating network
C dados referentes as chaves do sistema elétrico
G1A  CH1A  15.15E-02 1.000E+02 0.000E+00          0
G1B  CH1B  15.15E-02 1.000E+02 0.000E+00          0
G1C  CH1C  15.15E-02 1.000E+02 0.000E+00          0
NT1A CH2A   1.00E+00 1.000E+02 0.000E+00          0
NT1B CH2B   1.00E+00 1.000E+02 0.000E+00          0
NT1C CH2C   1.00E+00 1.000E+02 0.000E+00          0
LDA  CHGA  -1.00E+00 1.000E+02 0.000E+00          0
LDB  CHGB  -1.00E+00 1.000E+02 0.000E+00          0
LDC  CHGC  -1.00E+00 1.000E+02 0.000E+00          0
C Chaves referentes a ligação dos taps do transformador a terra
C Ligação TRIANGULO
N10TA      14.68E+02 1.000E+02 0.000E+00          0
N50TA      1.010E+03 1.000E+02 0.000E+00          0
N80TA      1.010E+03 1.000E+02 0.000E+00          0
C Chave referente a ligação entre as fases do enrolamento TRIANGULO
C N50TA N50TB 1.010E+02 1.000E+02 0.000E+00          0
C Chaves referentes a falta entre Trafo e TC2
TSECA RFTTCA 1.00E+03 1.000E+02 0.000E+00          0
TSECB RFTTCB 1.00E+03 1.000E+02 0.000E+00          0
TSECC RFTTCC 1.00E+03 1.000E+02 0.000E+00          0
C Chaves referentes a falta externa próxima ao transformador de potência
CH2A RFPXTA 1.00E+03 1.000E+02 0.000E+00          0
CH2B RFPXTB 1.00E+03 1.000E+02 0.000E+00          0
CH2C RFPXTC 1.00E+03 1.000E+02 0.000E+00          0
C Chaves referentes a falta na linha de distribuição
LDA  RFLDA  1.00E+03 1.000E+02 0.000E+00          0
LDB  RFLDB  1.00E+03 1.000E+02 0.000E+00          0
LDC  RFLDC  1.00E+03 1.000E+02 0.000E+00          0
C Chaves referentes a condição de rejeição de carga
CHGA CHRJA  1.00E+03 1.000E+02 0.000E+00          0
CHGB CHRJB  1.00E+03 1.000E+02 0.000E+00          0
CHGC CHRJC  1.00E+03 1.000E+02 0.000E+00          0
C Saída dos TCS
STC1A                                MEASURING          1
STC1B                                MEASURING          1
STC1C                                MEASURING          1
STC2A                                MEASURING          1
STC2B                                MEASURING          1
STC2C                                MEASURING          1
C CHAVE DE MEDIDA DO NEUTRO TRAF0 PRINCIPAL
NEUT1 NN1                            MEASURING          1
BLANK card terminating switches
C dados referentes ao gerador
14FONTA 0 112.7E+03 6.000E+01 0.000E+02          0          -1.000E+00 1.000E+02
14FONTB 0 112.7E+03 6.000E+01 -1.200E+02         0          -1.000E+00 1.000E+02
14FONTC 0 112.7E+03 6.000E+01 1.200E+02          0          -1.000E+00 1.000E+02
BLANK card terminating sources
C CH1A CH1B CH1C NT1A NT1B NT1C
BLANK card terminating outputs
BLANK card terminating plots
BEGIN NEW DATA CASE

```

### APÊNDICE C

Dados da curva de saturação do transformador de potência de 25MVA, 138/13,8kV utilizado.

<b>Corrente (A)</b>	<b>Fluxo (Wb)</b>
1,061	26,899
3,288	29,888
20,851	32,877
129,055	34,372
380,764	35,268

Dados da curva de saturação dos transformadores de corrente.

<b>Corrente (A)</b>	<b>Fluxo (Wb)</b>
0,00283	0,02625
0,00521	0,07502
0,00805	0,1313
0,00937	0,1613
0,01305	0,2813
0,02693	0,7502
0,03639	1,2754
0,06234	1,6131
0,08518	1,7631
0,17825	1,8756
0,45354	2,0632