

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

Luccas dos Santos Durlo

**DETECÇÃO DE CORRENTES DE *INRUSH* EM TRANSFORMADORES DE
POTÊNCIA: ANÁLISE COMPARATIVA E UMA NOVA PROPOSTA BASEADA EM
TRANSFORMADA WAVELET SINCRONIZADA E BAG OF FEATURES**

Alegrete

2025

Luccas dos Santos Durlo

**DETECÇÃO DE CORRENTES DE *INRUSH* EM TRANSFORMADORES DE
POTÊNCIA: ANÁLISE COMPARATIVA E UMA NOVA PROPOSTA BASEADA EM
TRANSFORMADA WAVELET SINCRONIZADA E BAG OF FEATURES**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação *Stricto Sensu* em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Machado dos Santos

Alegrete
2025

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

D947d Durlo, Luccas dos Santos

Detecção de correntes de inrush em transformadores de
potência: análise comparativa e uma nova proposta baseada em
Transformada Wavelet Sincronizada e Bag of Features / Luccas
dos Santos Durlo.

99 p.

Dissertação(Mestrado)-- Universidade Federal do Pampa,
MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, 2025.

"Orientação: Eduardo Machado dos Santos".

1. Inrush. 2. Correntes de Inrush. 3. Transformador. 4.
Sistema Elétrico de Potência. 5. PSCAD. I. Título.

LUCCAS DOS SANTOS DURLO

**DETECÇÃO DE CORRENTES DE INRUSH EM TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA:
ANÁLISE COMPARATIVA E UMA NOVA PROPOSTA BASEADA EM TRANSFORMADA
WAVELET SINCRONIZADA E BAG OF FEATURES**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica

Dissertação defendida e aprovada em: 05/09/2025

Banca examinadora:

Prof. Dr. Eduardo Machado dos Santos

Orientador

UNIPAMPA

Prof. Dr. Ghendy Cardoso Junior

UFSM

Prof. Dr. Fernando Guilherme Kaehler Guarda

CTISM-UFSM



Assinado eletronicamente por **EDUARDO MACHADO DOS SANTOS, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 05/09/2025, às 11:04, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **GHENDY CARDOSO JUNIOR, Usuário Externo**, em 05/09/2025, às 11:11, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **Fernando Guilherme Kaehler Guarda, Usuário Externo**, em 05/09/2025, às 11:28, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1819571** e o código CRC **2C1F111F**.

RESUMO

Também conhecida como corrente de *inrush*, a corrente de magnetização surge quando o transformador é energizado. Devido às suas características transitórias e à alta amplitude, essa corrente pode provocar atuações indevidas dos relés de proteção, resultando em disparos incorretos. O principal objetivo deste trabalho é comparar diferentes métodos de detecção dessa corrente presentes na literatura, os quais se baseiam na análise da corrente diferencial para distinguir eventos de energização de transformadores de eventos decorrentes de faltas. Para isso, foram utilizados bancos de dados simulados no software PSCAD, sendo que os métodos foram implementados e testados no ambiente MATLAB. Neste estudo, também propõe-se uma abordagem baseada na Transformada Wavelet Sincronizada (TWS) combinada com o modelo *Bag of Features* (BoF), avaliando sua eficácia sob variadas condições operacionais, como diferentes ângulos de chaveamento, instantes de ocorrência da falta e níveis de tensão do ponto de joelho da curva de saturação magnética. O trabalho demonstra a importância de desenvolver e aplicar métodos de detecção eficazes que possam identificar precisamente as correntes de *inrush*, minimizando os falsos disparos e garantindo a confiabilidade do sistema de proteção. Nesse contexto, o método proposto — Detecção de Inrush por Processamento de Imagens (DIPI) — apresentou desempenho superior, destacando-se pela sua abordagem baseada na TWS e na classificação de imagens por meio do algoritmo BoF.

Palavras-chave: *Inrush*. Correntes de *Inrush*. Transformador. Sistema Elétrico de Potência. Transformadores de Potência. PSCAD.

ABSTRACT

Also known as inrush current, magnetizing current arises during transformer energization. Due to its transient characteristics and high amplitude, this current can cause unwanted operations of protection relays, resulting in incorrect tripping. The main objective of this work is to compare different detection methods found in the literature, which are based on the analysis of differential current to distinguish transformer energization events from fault-related events. For this purpose, simulated datasets generated in PSCAD were used, and the methods were implemented and tested in the MATLAB environment. This study also proposes an approach based on the Synchrosqueezed Wavelet Transform (SWT) combined with the Bag of Features (BoF) model, evaluating its effectiveness under various operating conditions, such as different switching angles, fault inception times, and knee-point voltage levels of the magnetic saturation curve. The results highlight the importance of developing and applying accurate detection methods capable of precisely identifying inrush currents, minimizing false trips, and ensuring the reliability of protection systems. In this context, the proposed method — DIPI — achieved superior performance, standing out for its image-based classification strategy supported by SWT and BoF.

Keywords: Inrush. Inrush currents. Transformer. Power Electrical System. Power Transformers. PSCAD.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Representação do campo magnético (B) em torno de um condutor cilíndrico reto, conduzindo uma corrente elétrica (i), com o raio do campo magnético indicado por (r).	30
Figura 2 – Demonstração de uma tensão induzida (E) em um laço condutor circundando um campo magnético (B) que varia no tempo.	31
Figura 3 – Representação da indução de tensão (E) em um condutor devido ao campo magnético (B) gerado pela corrente elétrica (i) em um transformador.	32
Figura 4 – Canalização de um campo magnético (B) através de um núcleo magnético.	32
Figura 5 – Esquemático de um transformador operando sem carga.	33
Figura 6 – Diagrama fasorial da corrente de excitação.	34
Figura 7 – Característica B-H sem o laço de histerese.	36
Figura 8 – Característica B-H com o laço de histerese.	37
Figura 9 – Ramo de magnetização de um transformador.	37
Figura 10 – Formas de onda quando a tensão é máxima.	39
Figura 11 – Formas de onda quando a tensão é zero.	40
Figura 12 – Decaimento da corrente do <i>inrush</i>	41
Figura 13 – Diagrama de um sistema elétrico com dois transformadores, T_1 e T_2	42
Figura 14 – Comparação entre a Corrente de <i>Inrush</i> em T_2 e a Energização Solidária em T_1	43
Figura 15 – Esquemático da proteção diferencial.	44
Figura 16 – Curva de sensibilização do relé.	45
Figura 17 – Definição das caixas.	48
Figura 18 – Fluxograma do algoritmo da dimensão da caixa.	49
Figura 19 – Fluxograma do TEO.	51
Figura 20 – Fluxograma do MCW.	53
Figura 21 – Comparação entre a TWC e a TWS. (a) Sinal da Equação 4.5. (b) Transformada Wavlet Contínua. (c) Transformada Wavelet Sincronizada.	57
Figura 22 – Etapas do BoF	59
Figura 23 – As vinte características mais fortes extraídas pelo SURF. (a) Espectrograma gerado pela TWS para o <i>inrush</i> . (b) SURF aplicado ao espectrograma gerado para o <i>inrush</i> . (c) Espectrograma gerado pela TWS para a falta. (d) SURF aplicado ao espectrograma gerado para a falta.	60
Figura 24 – Histograma de Palavras	61
Figura 25 – Espectrogramas gerados pela TWS. (a) Configuração padrão do MATLAB. (b) Resolução e qualidade transformadas.	62
Figura 26 – Espectrogramas para situação de <i>inrush</i>	63
Figura 27 – Espectrogramas para situação de falta.	64
Figura 28 – Matriz de Confusão	65
Figura 29 – Fluxograma do DIPI.	66

Figura 30 – Sistema teste para <i>inrush</i>	69
Figura 31 – Sistema teste para faltas.	70
Figura 32 – Simulação do caso 1 para o DIPI. (a) Sinal de corrente diferencial fase A. (b) Espectrogramas gerados pela TWS. (c) Detecção do <i>inrush</i>	73
Figura 33 – Simulação do caso 1 para o MDC. (a) Sinal de corrente diferencial fase A. (b) Dimensões da caixa. (c) Detecção do <i>inrush</i>	73
Figura 34 – Simulação do caso 1 para o MTEO. (a) Sinal de corrente diferencial fase A. (b) ψ_A . (c) FI_A . (d) Detecção do <i>inrush</i>	74
Figura 35 – Simulação do caso 1 para o MCW. (a) Sinal de corrente diferencial fase A. (b) MCW. (c) Detecção do <i>inrush</i>	74
Figura 36 – Simulação do caso 2 para o DIPI. (a) Sinal de corrente diferencial fase A. (b) Espectrogramas gerados pela TWS. (c) Detecção do <i>inrush</i>	76
Figura 37 – Simulação do caso 2 para o MDC. (a) Sinal de corrente diferencial fase A. (b) Dimensões da caixa. (c) Detecção do <i>inrush</i>	76
Figura 38 – Simulação do caso 2 para o MTEO. (a) Sinal de corrente diferencial fase A. (b) ψ_A . (c) FI_A . (d) Detecção do <i>inrush</i>	77
Figura 39 – Simulação do caso 2 para o MCW. (a) Sinal de corrente diferencial fase A. (b) MCW. (c) Detecção do <i>inrush</i>	77
Figura 40 – Simulação do caso 3 para o DIPI. (a) Sinal de corrente diferencial fase B. (b) Espectrogramas gerados pela TWS. (c) Detecção do <i>inrush</i>	79
Figura 41 – Simulação do caso 3 para o MDC. (a) Sinal de corrente diferencial fase B. (b) Dimensões da caixa. (c) Detecção do <i>inrush</i>	79
Figura 42 – Simulação do caso 3 para o MTEO. (a) Sinal de corrente diferencial fase B. (b) ψ_B . (c) FI_B . (d) Detecção do <i>inrush</i>	80
Figura 43 – Simulação do caso 3 para o MCW. (a) Sinal de corrente diferencial fase B. (b) MCW. (c) Detecção do <i>inrush</i>	80
Figura 44 – Simulação do caso 4 para o DIPI. (a) Sinal de corrente diferencial fase B. (b) Espectrogramas gerados pela TWS. (c) Detecção do <i>inrush</i>	82
Figura 45 – Simulação do caso 4 para o MDC. (a) Sinal de corrente diferencial fase B. (b) Dimensões da caixa. (c) Detecção do <i>inrush</i>	82
Figura 46 – Simulação do caso 4 para o MTEO. (a) Sinal de corrente diferencial fase B. (b) ψ_B . (c) FI_B . (d) Detecção do <i>inrush</i>	83
Figura 47 – Simulação do caso 4 para o MCW. (a) Sinal de corrente diferencial fase B. (b) MCW. (c) Detecção do <i>inrush</i>	83
Figura 48 – Simulação do caso 5 para o DIPI. (a) Sinal de corrente diferencial fase C. (b) Espectrogramas gerados pela TWS. (c) Detecção do <i>inrush</i>	85
Figura 49 – Simulação do caso 5 para o MDC. (a) Sinal de corrente diferencial fase C. (b) Dimensões da caixa. (c) Detecção do <i>inrush</i>	85

Figura 50 – Simulação do caso 5 para o MTEO. (a) Sinal de corrente diferencial fase C. (b) ψ_C . (c) FI_C .(d) Detecção do <i>inrush</i>	86
Figura 51 – Simulação do caso 5 para o MCW. (a) Sinal de corrente diferencial fase C. (b) MCW. (c) Detecção do <i>inrush</i>	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros do transformador trifásico de dois enrolamentos.	70
Tabela 2 – Parâmetros da fonte de tensão trifásica.	70
Tabela 3 – Resultado das simulações para 32 amostras/ciclo para energização do transformador sem carga.	89
Tabela 4 – Resultado das simulações para 32 amostras/ciclo para energização do transformador com carga.	90
Tabela 5 – Resultado das simulações para 32 amostras/ciclo para faltas monofásicas, bifásicas e trifásicas-terra.	91

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	Considerações Gerais	19
1.2	Objetivos	19
1.3	Justificativas	20
1.4	Revisão Bibliográfica	20
1.5	Estrutura da Dissertação	28
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	29
2.1	Considerações Gerais	29
2.2	Princípios Básicos do Transformador	29
2.2.1	Construção de um Transformador Rudimentar	29
2.2.2	Processo de Excitação de um Transformador	33
2.3	<i>INRUSH</i>	38
2.3.1	Fundamentos da Corrente de <i>Inrush</i>	38
2.3.2	Energização Solidária (sympathetic inrush)	41
2.4	Princípios da Proteção Diferencial	43
2.5	Considerações Finais	46
3	MÉTODOS PARA DETECÇÃO DE CORRENTES DE <i>INRUSH</i> ANALISADOS	47
3.1	Considerações Gerais	47
3.2	Método baseado na dimensão da caixa (MDC)	47
3.3	Método do TEO (MTEO)	49
3.4	Método baseado nos modos de correlação Wavelet (MCW)	52
3.5	Considerações Finais	54
4	MÉTODO PROPOSTO PARA IDENTIFICAÇÃO DA CORRENTE DE <i>INRUSH</i> BASEADO NA TRANSFORMADA WAVELET SINCRONIZADA (TWS) E <i>BAG OF FEATURES</i> (BOF)	55
4.1	Considerações Gerais	55
4.2	Transformada Wavelet Sincronizada (TWS)	55
4.3	Bag of Features (BoF)	58
4.3.1	Detectores e Descritores de Características	59
4.3.2	Frequência de ocorrência das palavras em uma imagem	61
4.4	Descrição do método proposto	62
4.5	Considerações Finais	67
5	RESULTADOS	69
5.1	Considerações Gerais	69

5.2	Sistema Teste	69
5.3	Caso 1: Energização do Transformador sem carga	71
5.4	Caso 2: Energização do Transformador com carga	75
5.5	Caso 3: Falta Monofásica-Terra	78
5.6	Caso 4: Falta Bifásica-Terra	81
5.7	Caso 5: Falta Trifásica-Terra	84
5.8	Discussões sobre os Resultados	87
6	CONCLUSÕES	93
6.1	Conclusões	93
6.2	Sugestões para Trabalhos Futuros	94
	REFERÊNCIAS	95

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

No contexto dos Sistemas Elétricos de Potência (SEP), os transformadores são componentes cruciais, desempenhando um papel indispensável na transmissão eficiente de energia entre diferentes níveis de tensão, para minimizar as perdas do sistema. A proteção desses transformadores, portanto, deve ser altamente eficaz, sendo capaz de identificar e reagir adequadamente a falhas, tanto internas quanto externas, para garantir a durabilidade e a operacionalidade do equipamento.

Um dos desafios enfrentados na proteção desses transformadores é o fenômeno da corrente de magnetização, também conhecida como corrente de *inrush*, que ocorre durante a sua energização. Essa corrente flui apenas pelo lado primário e pode atingir magnitudes superiores à corrente nominal. Embora não represente uma condição de falha real, pode induzir operações indevidas da proteção. A corrente de *inrush* apresenta características únicas, exigindo que o sistema de proteção seja capaz de diferenciar entre a ocorrência de *inrush* ou situação de falta.

A importância dos transformadores de potência no SEP juntamente com os desafios associados à sua proteção destaca a necessidade de um esquema de proteção capaz de evitar falsas atuações devido à essas correntes, mas também considerando as interações normais entre os equipamentos do sistema, assegurando uma resposta eficaz diante de fenômenos transitórios, sem comprometer a integridade do sistema. Assim, a proteção deve ser capaz de garantir uma operação ininterrupta e eficiente, reduzindo os desligamentos não programados e assegurando a continuidade do fornecimento de energia elétrica.

1.2 OBJETIVOS

Este trabalho visa, principalmente, propor um novo método para a detecção de correntes de *inrush*, analisando também o desempenho de metodologias existentes para fins comparativos. O objetivo é avaliar o desempenho dessas metodologias em um banco de dados, utilizando o software PSCAD para simular variadas condições operacionais do Sistema Elétrico de Potência (SEP). Os objetivos específicos incluem:

- A implementação de metodologias para a identificação de correntes de *inrush* utilizando o MATLAB, e
- A avaliação do desempenho das metodologias implementadas em cenários de energização de transformadores, com e sem carga, sob diferentes ângulos de chaveamento e parâmetros específicos, bem como para situações de faltas externas em diferentes pontos da Linha de Transmissão (LT).

Entre as principais contribuições deste trabalho, destacam-se:

- A comparação do desempenho das metodologias implementadas sob diversas condições de faltas e *inrush*;
- A proposta de uma nova metodologia; e
- A análise de qual metodologia apresenta melhor desempenho para cada cenário testado.

1.3 JUSTIFICATIVAS

Apesar dos avanços vistos na literatura na criação de distintas técnicas, não existe uma técnica padrão universalmente aceita para a diferenciação entre correntes de *inrush* e faltas. Isso se deve, em parte, às evoluções nos materiais e tecnologias aplicadas nos transformadores, que alteram as características dessas correntes e exigem constantes ajustes e inovações nas técnicas para sua detecção.

Dada esta variedade de abordagens e a falta de um consenso sobre a técnica mais eficaz, torna-se crucial a realização de estudos comparativos e a criação e avaliação de novas técnicas, bem como a comparação do desempenho de novas técnicas com as já existentes. Tal pesquisa permitirá determinar não apenas a eficácia de cada método em diferentes cenários, mas também ajudará a desenvolver uma compreensão mais profunda sobre as vantagens e limitações de cada técnica para este fim.

1.4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As metodologias iniciais para prevenir atuações indevidas do relé diferencial durante a energização utilizavam um retardo de tempo intencional ou uma dessensibilização temporária da proteção. Isso faz com que o relé passe por condições transitórias, como correntes de *inrush* durante a energização do transformador, sem desarmar. O retardo permite que o sistema tenha tempo suficiente para se estabilizar antes que o relé opere. Entretanto, com os avanços subsequentes nos estudos envolvendo relés de proteção, foi identificada a presença de componentes harmônicas na corrente de magnetização, especialmente as de segunda ordem, tornando possível elaborar estratégias baseadas nessas componentes, como a proposta de Hayward (1941), onde foi criado um tipo de relé diferencial com restrição de corrente harmônica para proteção de transformadores de dois enrolamentos. Uma vez que as correntes diferenciais originadas por uma falta interna e a corrente de *inrush* apresentam padrões de onda distintos, o relé proposto pelo referido autor tem a capacidade de diferenciá-las ao analisar as componentes harmônicas na forma de onda da corrente. Dessa forma, ele atua em situações onde o percentual de harmônicos é inferior ao limiar pré-estabelecido, sinalizando a ocorrência de uma falta interna. Em contrapartida, o relé evita a operação quando o percentual de harmônicos é superior, indicando a corrente de *inrush*.

Não obstante, com as evoluções dos materiais e tecnologias aplicadas nos transformadores, observou-se uma diminuição na presença de harmônicos nas correntes, exigindo, assim, não

apenas refinamento nas técnicas preexistentes, mas também a incorporação de novas abordagens que explorassem diferentes características evidenciadas durante a magnetização.

Nesse contexto, Schweitzer R.R. Larson (1977) desenvolveu quatro filtros de resposta finita ao impulso (FIR), sendo dois destes para componente fundamental e dois para a segunda harmônica. Estes filtros abrangem um ciclo de tempo completo e alternam entre valores de mais ou menos um, simplificando o processo de determinar a reação dos filtros à entradas variáveis por meio da soma de amostras da entrada, ajustando o sinal conforme necessário e de acordo com a respostas ao impulso. A partir da saída dos filtros, é possível determinar a operação do relé de proteção.

Já Degens (1981) desenvolveu um algoritmo baseado no ajuste da curva de mínimos quadrados da corrente diferencial amostrada, bem como pelo decaimento DC e cinco componentes harmônicos. A detecção de *inrush* ocorre através da proporção entre a segunda harmônica e a componente fundamental da corrente diferencial. O algoritmo foi validado *offline* com dados simulados de faltas e correntes de magnetização.

Ainda, Rahman (1982) propôs utilizando a técnica de transformada Fourier um algoritmo rápido e preciso para a proteção de transformadores. O algoritmo calcula os coeficientes de Fourier apenas por meio de rotinas de adição e subtração. A principal vantagem da metodologia é a simplicidade e à ausência de cálculos demorados de multiplicação e divisão. O algoritmo foi proposto para a proteção de sistemas de energia baseados em microprocessadores. Validando-se em simulações digitais de faltas e correntes de energização.

Dois anos após, Fakruddin et al. (1984) propuseram o desenvolvimento de algoritmos baseados em funções de Haar para isolar componentes de frequência específicos em sinais transitórios de relés de proteção. Além da utilização do algoritmo na proteção diferencial do transformador, foi utilizado também na detecção de impedância na proteção de linhas de transmissão. Para a proteção diferencial dos transformadores de potência, são comparadas as harmônicas de segunda e quinta ordem com a fundamental para determinar a interrupção ou não do relé de proteção.

No ano seguinte, Jeyasurya e Rahman (1985a) e Jeyasurya e Rahman (1985b) utilizaram as funções de Walsh para a proteção diferencial de transformadores de potência em um relé diferencial digital que aplica o algoritmo de Walsh, o qual é simulado em um computador.

Já na década seguinte, Hijazi e Basak (1993) propuseram uma forma de prever a corrente de *inrush*, utilizando o método da integral. Tal processo envolve simular o comportamento transitório do transformador e integrar a forma de onda da corrente ao longo de cada ciclo, calculando a área acumulada sob a forma de onda da corrente usando a regra de Simpson, obtendo-se o valor de pico de cada ciclo. A constante de integração é ajustada para fornecer a discriminação entre as correntes de falta e de magnetização, sendo mais alta para o *inrush* e menor para as correntes oriundas de uma falta.

Tat-Wai, Chee-Keong e Hoay-Beng (1993) utilizaram uma rede neural artificial (RNA) para detectar a corrente de *inrush*. A metodologia se baseou na proporção dos componentes

harmônicos nas formas de onda da corrente. A rede neural é treinada usando o conteúdo harmônico da corrente obtida de um transformador de potência. A partir disso, a RNA analisa a quantidade das componentes fundamental, segunda e terceira harmônicas.

Ainda no contexto das RNAs, Perez et al. (1994) propuseram o uso de uma rede neural *feedforward* (FFNN) para diferenciar entre correntes de *inrush* e de falta. A rede foi treinada utilizando um algoritmo de retropropagação, e os resultados indicaram que o FFNN pode ser um método eficaz para a correta distinção entre essas correntes.

Após, Swift, Zhang e McLaren (1995) apresentam uma comparação entre o método tradicional, que utiliza a componente de segunda harmônica, e um novo método que se baseia na seção horizontal ou plana da forma de onda da corrente de *inrush*. O método consiste em calcular a diferença entre cada amostra atual e a anterior. Se os valores absolutos de um número de amostras estiverem abaixo de um limite durante um ciclo, então a forma de onda é classificada como *inrush*. O autor reforça que o seu método é mais vantajoso, pois pode ser implementado de forma simples e é mais eficaz que o método tradicional em diversas ocasiões.

Yabe (1997) propôs um método que utiliza da soma da potência ativa que flui para o transformador a partir de cada terminal. Em operação normal, a potência que flui para o transformador é muito pequena, pois as perdas no cobre e a perda no núcleo são inferiores a 1% da capacidade do transformador. Contudo, no caso de uma falta interna, uma quantidade significativa de potência é consumida e, durante a energização, a potência média é quase zero. Ao comparar a potência média com um determinado limite, o método pode diferenciar entre a corrente de magnetização e uma falta interna.

Além disso, Jiao et al. (1998) utilizam a transformada Wavelet (TW) e várias integrais para detectar a corrente de *inrush*. A TW é aplicada para extrair a característica do ângulo morto da forma de onda. Ao analisar as transformadas Wavelet em diferentes escalas, os autores observaram que os vizinhos locais máximos das TWs da corrente de falta aparecem com sinais diferentes e com a mesma distância, enquanto que para a corrente de *inrush* eles aparecem às vezes com os mesmos sinais e distâncias diferentes. Esta diferença é utilizada para detectar a corrente de *inrush*, que possui características simétricas. Somando-se a integral, os autores conseguem determinar a simetria ou assimetria da forma de onda e fazer a correta classificação da corrente através da lógica Fuzzy fundamentada nesses dois fatores.

Também utilizando a TW, Gomez-Morante e Nicoletti (1999) propuseram um método para distinguir entre faltas internas e correntes de magnetização na proteção de transformadores de potência. Os autores compararam a abordagem tradicional da análise de Fourier com o seu método, reforçando que a análise por meio da TW fornece uma representação mais fiel da localização do sinal nos domínios do tempo e da frequência, uma vez que ela decompõe o sinal em diferentes níveis de resolução, permitindo uma análise detalhada dos sinais transitórios. Em contraste, a análise de Fourier calcula a média das características da frequência ao longo do tempo, proporcionando uma caracterização menos precisa da corrente.

Bo, Weller e Lomas (2000) obtêm as correntes diferenciais e médias. A partir disso, as

energias espectrais destas correntes são extraídas para produzir sinais de operação e restrição. Se a energia espectral do sinal de operação for maior que a do sinal de restrição, isso indica uma falta interna e o relé funcionará. Por outro lado, se a energia espectral do sinal de operação for inferior à do sinal de restrição, isso indica uma falta externa e o relé será impedido de operar. Os autores também propõem uma nova técnica de detecção de *inrush*, na qual a corrente é detectada extraíndo os componentes de alta frequência do sinal transitório. O sinal de restrição é derivado da razão entre a energia espectral do sinal transitório e a corrente fundamental. Uma comparação com um limite determina se está ocorrendo *inrush* ou não.

Já Orille-Fernandez, Ghonaim e Valencia (2001) apresentam uma Rede Neural Artificial de Resposta ao Impulso Finito (FIRANN) como proteção diferencial para um transformador de potência trifásico. No estudo, foram propostas três FIRANNs: a primeira distingue faltas internas do *inrush* e faltas externas; as demais possuem duas saídas, diferenciando faltas internas das externas e fornecendo proteção extra. No total, esta rede possui seis entradas que capturam os sinais de corrente de ambos os lados do transformador e operam com uma frequência de amostragem de 2kHz para uma frequência de 50 Hz.

Lin, Liu e Malik (2002) propuseram um algoritmo de correlação aprimorado para diferenciar entre *inrush* e faltas internas em transformadores. Neste método, as correntes ao longo de cada ciclo são reorganizadas em dois novos sinais: o primeiro sinal é denotado como "A" e pertence ao primeiro meio ciclo; o segundo sinal é chamado de "B" e representa os valores do último meio ciclo. A partir daí, a correlação entre A e B é calculada por meio de um coeficiente de correlação (CC). Se o coeficiente de correlação exceder um determinado limite, indica a presença de uma falta interna, ao contrário, detecta o *inrush*.

Ainda, Zhao, Chai e Su (2003) propuseram um novo método para identificar correntes de *inrush* em transformadores de potência. As correntes e tensões medidas nos enrolamentos do transformador são utilizadas para construir o local do fluxo principal e determinar se ele está dentro da zona de saturação. Com base nessa análise, é definido um critério para identificar as correntes de *inrush*. As simulações foram realizadas no software EMTP.

Além disso, Zheng et al. (2004) utilizam da análise da potência instantânea diferencial para distinguir entre uma corrente de falta interna e o *inrush* em transformadores. O método é baseado na relação entre a componente DC e a componente fundamental da potência instantânea. Quando ocorre uma falta interna, a potência instantânea diferencial apresenta uma componente DC significativa. Por outro lado, quando ocorre a energização do transformador, a potência instantânea diferencial terá uma componente fundamental mais elevada. Com base nesta análise, um critério é definido para a correta distinção entre essas correntes.

Yan, Jing e Zengping (2005) propuseram o uso da análise da função de correlação no processamento digital de sinais para diferenciar as correntes de *inrush* da corrente de curto-circuito na proteção do transformador. Neste método, os dados amostrados da forma de onda são tratados como um sinal aleatório. A função de correlação é um algoritmo estatístico usado para medir a similaridade entre dois sinais aleatórios ou a autossimilaridade de um único sinal

aleatório. Ao calcular a função de autocorrelação padrão (SSCF), a similaridade entre a forma de onda e o SSCF pode ser determinada. A partir disso a magnitude do coeficiente de similaridade é utilizada para distinguir entre a corrente de magnetização do transformador e a corrente de curto-circuito.

Outra proposta para a detecção das correntes de *inrush* é a ideia exposta em Jing et al. (2006) onde os autores apresentam um algoritmo baseado em morfologia matemática. Primeiramente, o método aplica a técnica de morfologia matemática, conhecida como gradiente morfológico para extrair os sinais transitórios e destacar mudanças repentinas na forma de onda. Em seguida, a filtragem adaptativa é aplicada para suprimir os ruídos presentes nos sinais e melhorar a precisão da análise. Com base nas diferentes características observadas nos sinais transitórios entre a corrente de curto-circuito e a corrente de *inrush*, o algoritmo utiliza de um critério para a correta distinção entre as duas formas de onda.

Guerreiro e Pires (2007) utilizam várias transformadas de Park para a identificação da forma de onda do *inrush* através do conteúdo harmônico das correntes diferenciais obtidas de um transformador de potência simulado via software Matlab/Simulink. A técnica da transformação de Park é aplicada a cada componente harmônico, convertendo-os em componentes DC. Como a corrente de *inrush* contém uma grande proporção de conteúdos de segundo harmônico em comparação a uma falta interna, a lógica do relé diferencial foi baseada nesta abordagem.

Também, Han et al. (2008) propuseram um algoritmo denominado *short-window filter* que detecta a corrente de *inrush* analisando as magnitudes da forma de onda da corrente e as compara com os valores obtidos pelo filtro de Fourier. Quando o algoritmo do autor é aplicado, as magnitudes calculadas flutuam significativamente em torno das magnitudes calculadas pelo filtro de Fourier de um ciclo. Por outro lado, quando ocorre uma falta interna no transformador, as magnitudes calculadas pelo algoritmo são próximas daquelas calculadas pelo filtro de Fourier de um ciclo. Com base nessas magnitudes, um critério é estabelecido para a detecção do *inrush*.

Em Zhang, Jiao e Wang (2009), os autores apresentam um novo método para identificar correntes de *inrush* e faltas internas em transformadores usando a transformada S hiperbólica (TSH). A técnica baseia-se em obter a fase do sinal usando a TSH para obter os contornos do domínio do tempo e da frequência. A discriminação do sinal de uma falta interna e do *inrush* é feita com base nas características obtidas pela transformada e na comparação com os dados obtidos por uma Transformada Wavelet Discreta (TWD), além de classificar usando redes neurais para uma melhor precisão do algoritmo.

Ma, Wang e Wu (2010) propuseram um algoritmo que utiliza o fator de singularidade da forma de onda (WSF) para diferenciar entre correntes de *inrush* e faltas internas. O algoritmo WSF calcula a diferença entre a forma de onda da corrente real e uma forma de onda senoidal pura. Ele mede a singularidade da forma de onda analisando as suas variações. Se o WSF de uma fase exceder um determinado limite, indica a presença do fenômeno de *inrush*. Por outro lado, se o WSF estiver abaixo do limite, isso implica em uma falta interna.

Já em Ma et al. (2011), utiliza-se a curva de grade normalizada (NGC) para a correta

distinção entre as correntes de *inrush* do transformador e as correntes de falta interna. Primeiramente, o algoritmo calcula o NGC para as correntes diferenciais do transformador. O NGC é calculado dividindo a forma de onda da corrente diferencial em pequenos intervalos de tempo e calculando o valor médio dos valores absolutos das correntes diferenciais dentro de cada intervalo. Em seguida, o algoritmo aplica dois critérios para discriminar entre correntes de *inrush* e faltas internas nos domínios do tempo e da frequência. No domínio do tempo, o algoritmo analisa o NGC da fase defeituosa. Se o NGC for quase constante ao longo do tempo, isso indica uma falta interna. Se o NGC apresentar variação severa, isso indica uma corrente de *inrush*. Já no domínio da frequência, o algoritmo analisa o NGC da fase defeituosa para determinar a relação entre a frequência fundamental e os componentes DC.

Liu (2012) propôs um método composto por vários algoritmos conhecidos para a identificação da corrente de magnetização do transformador. Os algoritmos incluem o cálculo da proporção do 2º harmônico, ângulo morto, princípio do grau senoidal, princípio da indutância instantâneas e outros critérios. Cada algoritmo possui um coeficiente de acordo com sua confiabilidade. Calculando os resultados de cada algoritmo individual e simultaneamente os resultados obtidos são usados para definir os bits de sinalização. Se a corrente for identificada como *inrush*, o bit de sinalização será definido como 1. Se não for *inrush*, o bit do sinalizador é definido como 0.

Além disso, um método que utiliza um algoritmo de gradiente morfológico aprimorado (MGA) é apresentado em Wu et al. (2013). O MGA é uma técnica de morfologia matemática que processa sinais no domínio do tempo, tornado-o não afetado pela mudança de fase e pelo decaimento DC. Para extrair as características, o MGA aplica operadores morfológicos fundamentais, dilatação e erosão, à forma de onda do sinal de corrente. A dilatação expande uma forma específica para uma forma maior, enquanto a erosão encolhe. Ao aplicar estes operadores, o MGA calcula o gradiente morfológico da forma de onda. A partir desse gradiente, é realizado o critério para correta identificação da forma de onda da corrente.

Kaszteny, Fischer e Xia (2014) propuseram uma técnica que utiliza o princípio *dwell-time*, o qual se refere à existência de períodos de correntes pequenas e planas em cada ciclo da forma de onda do *inrush*. Os valores absolutos das correntes diferenciais em todas as três fases são somados para formar um novo sinal. Durante condições de *inrush*, este sinal tende a ser muito baixo durante os períodos de *dwell-time* porque todas as três correntes diferenciais exibem seus tempos de *dwell-time* ao mesmo tempo. Enquanto que para condições de falta interna, este sinal é alto e reflete a corrente de falta.

Novamente, RNAs são utilizadas para classificar padrões na proposta de Balaga, Gupta e Vishwakarma (2015), para classificar padrões, diferenciando entre operações normais, correntes de *inrush*, sobreexcitação e faltas internas de um transformador de potência. O método utiliza várias configurações de RNAs, incluindo uma abordagem com o uso de duas RNAs em configuração Mestre-Escravo. Para o treinamento dessas redes, foram utilizados tanto o Algoritmo de Retropropagação (BP) quanto o o Algoritmo Genético (GA), sendo que o GA

apresentou melhores resultados.

Guillén et al. (2016a) também utilizam a transformada wavelet discreta para processar correntes de falta e remover condições pré-falta. O algoritmo processa as correntes de falta usando a transformada wavelet discreta para obter a matriz wavelet. A partir desta, o algoritmo calcula a matriz de correlação para determinar os autovalores associados à cada escala de frequência. Ao comparar esses valores próprios com limites predeterminados, a metodologia pode determinar se a condição atual é uma corrente de *inrush* ou uma falta interna.

Uma nova abordagem para proteção diferencial de transformadores de potência, empregando a transformada empírica de Fourier (EFT) é proposta por Murugan et al. (2017). A componente fundamental do sinal é extraída e utilizada como uma característica de restrição tendenciosa, com um fator de desvio (DF) para tomar decisões de desarme e operação do relé.

Angrisani et al. (2018) apresentam um algoritmo baseado na Transformada de Huang-Hilbert (HHT) para detectar e classificar eventos transitórios em transformadores de potência. O HHT fornece uma representação tempo-frequência do sinal, e um índice específico, denominado desvio do fator de forma, o qual é avaliado na trajetória da frequência instantânea obtida através da HHT. Este índice é usado para classificar as correntes de *inrush*.

Weng et al. (2019) propuseram um método baseado no algoritmo de Distância de Hausdorff (HD). A técnica calcula a similaridade da forma de onda entre a corrente medida e um modelo padrão de forma de onda. O algoritmo normaliza a corrente diferencial para ter uma faixa de amplitude de -1 a 1, removendo assim as características de amplitude da corrente diferencial. Em seguida, uma onda senoidal padrão é criada com a mesma taxa de amostragem da corrente diferencial e também com amplitude de -1 a 1. O HD é aplicado para calcular a similaridade entre as duas formas de onda, e com base nos valores obtidos, a corrente diferencial pode ser identificada como sendo causada por uma falta interna ou uma corrente de *inrush*.

Behvandi, Seifossadat e Saffarian (2020) utilizam a transformada de Clarke e a transformada S hiperbólica modificada para extrair características importantes de sinais de corrente diferencial. Essas características extraídas são então usadas para classificar diferentes condições, incluindo a corrente de *inrush*. O trabalho também discute os efeitos da saturação de transformadores de corrente em condições transitórias.

Já Moreira et al. (2021) propõem uma técnica baseada no gradiente da corrente diferencial, a qual é capaz de distinguir correntes de *inrush* e de falta em transformadores de baixa potência. Esse gradiente determina o ângulo que este faz com o vetor unitário. Ao analisar a forma de onda da corrente, o algoritmo pode detectar a forma de onda característica das correntes de *inrush*.

Afrasiabi et al. (2022) apresentam uma rede neural recorrente com porta rápida (FGRNN) projetada para diferenciar entre correntes de *inrush* e distúrbios transitórios externos. O FGRNN é uma versão rápida da rede neural recorrente com unidade de *gating* (GRU), que é um tipo de rede neural recorrente (RNN). Nesse tipo de rede neural, é removida a porta de reset na GRU, o que reduz significativamente o tempo computacional. Ao remover a porta de reset, o FGRNN é

capaz de aprender mudanças abruptas nos sinais transitórios, o que é crucial para distinguir entre as correntes de *inrush* e faltas internas. Além da arquitetura modificada, ele também incorpora uma função de perda baseada na teoria da informação. Esta função de perda aumenta a capacidade de aprendizagem da rede e melhora sua robustez contra ruídos não gaussianos.

Chai, Zheng e Pan (2023) propuseram um novo algoritmo baseado em fasores rotativos para identificação de conteúdo harmônico de segunda ordem. Ele primeiro gira os fasores correspondentes da onda fundamental e do segundo harmônico de uma corrente em uma fase. Em seguida, recombina esses fasores girados com a onda fundamental e o segundo harmônico de outra corrente de fase. Esta combinação forma um novo cálculo para o conteúdo do segundo harmônico. Ao analisar a relação de amplitude desses novos fasores, o algoritmo pode identificar com exatidão o conteúdo do segundo harmônico e melhorar a precisão na identificação das correntes de *inrush*.

Visando superar as limitações de métodos tradicionais de detecção por harmônicos, Lu et al. (2024) propuseram uma metodologia baseada em morfologia matemática aliada a uma máquina de vetor de suporte por mínimos quadrados (LS-SVM) para identificação da corrente de *inrush*. De início, são extraídas características do sinal utilizando o operador de gradiente morfológico (MMG), o qual permite realçar as bordas do sinal de corrente diferencial. Em seguida, aplica-se o espectro de padrões morfológicos (MPS), responsável por descrever a distribuição de formas do sinal ao longo de múltiplas escalas. Esses dois critérios, o valor normalizado do MPS e o índice calculado a partir dos gradientes primário e secundário compõem o vetor de características que alimenta o classificador LS-SVM. O modelo é treinado para distinguir entre correntes de falta e de *inrush* em simulações realizadas no MATLAB/Simulink, que incluem casos de saturação de TC e diferentes ângulos de chaveamento.

Por fim, Li et al. (2025) propuseram uma nova estratégia utilizando redes neurais convolucionais (CNNs). A metodologia é baseada na identificação de segmentos saturados e não saturados da corrente diferencial. Inicialmente, esses segmentos são utilizados para treinar uma CNN denominada *source-CNN* (SCNN), cuja função é extrair as características relevantes das regiões não saturadas. Em seguida, com segmentos saturados e não saturados, alimentam outra rede, a *target-CNN* (TCNN) que aprende a focar nas regiões não saturadas ao minimizar as diferenças entre suas extrações e as obtidas pela SCNN. Essa minimização é implementada por meio de camadas de adaptação em cada nível convolucional, sendo o processo de treinamento conduzido por funções de perda que combina erros de classificação e adaptação.

Logo, com base na revisão bibliográfica apresentada, fica evidente que existem diversas técnicas e metodologias propostas para a prevenção de atuações indevidas do relé de proteção durante a energização de transformadores. Essas técnicas variam desde o uso de retardo de tempo intencional e dessensibilização temporária da proteção até abordagens mais sofisticadas, como algoritmos baseados em fasores rotativos, redes neurais, transformadas de Fourier, e outras. Assim, esse trabalho apresenta uma nova proposta para detecção das correntes de *inrush* em transformadores de potência, a qual é fundamentada na Transformada Wavelet Sincronizada

associada a técnica conhecida como *Bag of Features*.

1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

No Capítulo 2, é apresentada a fundamentação teórica, a qual foi utilizada para o desenvolvimento desse Trabalho.

No Capítulo 3, são apresentadas as técnicas implementadas para identificação das correntes de *inrush* que serão comparadas com a nova técnica.

No Capítulo 4, é apresentado o novo método para detecção de correntes de *inrush*.

No Capítulo 5, são apresentados os sistemas testes, os resultados das simulações assim como as discussões sobre os resultados obtidos.

Por fim, no Capítulo 6, são apresentadas as considerações finais e as sugestões para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

A compreensão dos princípios básicos dos transformadores é essencial, particularmente no que tange ao fenômeno das correntes de *inrush*. Estas correntes surgem no momento da energização de um transformador, podendo causar distúrbios significativos nos sistemas de energia e influenciar adversamente a operação dos equipamentos de proteção do sistema devido às suas características intrínsecas. A função primária de um sistema de proteção por relé é resguardar o sistema contra efeitos prejudiciais de faltas. Um curto-circuito em qualquer componente do sistema de energia deve ser rapidamente isolado para evitar instabilidades. Contudo, a presença de correntes de *inrush* pode levar a disparos falsos dos sistemas de proteção, uma vez que podem ser equivocadamente interpretados como faltas. Portanto, este capítulo enfoca na importância de entender o funcionamento de um transformador, as correntes de *inrush* e a operação adequada dos relés de proteção em sistemas elétricos de potência para prever, identificar e mitigar os efeitos dessas correntes transitórias, assegurando, assim, a estabilidade e eficiência dos sistemas de energia.

2.2 PRINCÍPIOS BÁSICOS DO TRANSFORMADOR

Esta seção dedica-se aos princípios básicos dos transformadores e às suas principais equações. Transformadores são componentes essenciais em praticamente todos os sistemas de distribuição de energia elétrica. Sua principal função é converter os níveis de tensão, adequando-os às necessidades de geração, transmissão e consumo. A estrutura do transformador é relativamente simples, consiste de duas ou mais bobinas de fio, conhecidas como enrolamentos, que estão magneticamente interligadas por meio de um núcleo comum. Este dispositivo opera com base no princípio da indução eletromagnética, um fenômeno que possibilita a indução de uma corrente elétrica em um circuito através da variação de um campo magnético. O estudo desses conceitos é vital para garantir uma compreensão sólida do funcionamento dos transformadores e para contribuir para o entendimento das demais seções desta dissertação

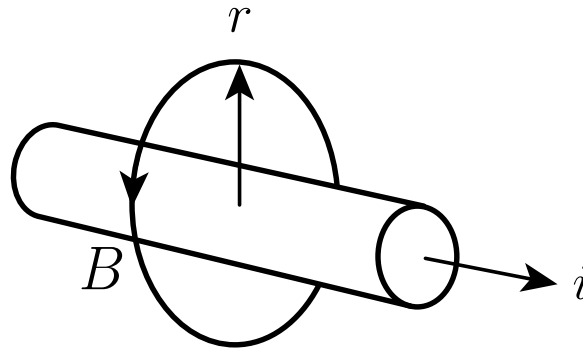
2.2.1 CONSTRUÇÃO DE UM TRANSFORMADOR RUDIMENTAR

Considerando um condutor cilíndrico reto por onde flui uma corrente (i), tal como representado na Figura 1. O condutor é envolto por um campo magnético (B), cuja orientação pode ser determinada pela regra da mão direita. Esta regra estabelece que, ao posicionar o polegar da mão direita na direção da corrente elétrica convencional, os dedos se curvam na direção do campo magnético circundante, que, neste caso, é anti-horário em relação ao condutor (WINDERS, 2002).

Quando se considera um caminho fechado em torno do condutor, seguindo um comprimento incremental (dl) alinhado com o campo magnético, a densidade do fluxo magnético, mostra-se proporcional à corrente que percorre o condutor, conforme demonstrado pela equação

de Maxwell para campos magnéticos em condutores retos, que é a Equação (2.1) (WINDERS, 2002).

Figura 1 – Representação do campo magnético (B) em torno de um condutor cilíndrico reto, conduzindo uma corrente elétrica (i), com o raio do campo magnético indicado por (r).



Fonte: Imagem adaptada de Winders (2002).

$$\int B \cdot dl = i \cdot \mu_0 \quad (2.1)$$

Nesta equação, μ_0 denota a permeabilidade magnética no vácuo, cujo valor é $4\pi \cdot 10^{-7} \text{ N/A}^2$. No caso de um condutor reto, o trajeto de B forma um caminho circular ao seu redor. À distância (r) do centro do condutor, podendo simplificar a Equação 2.1, resultando na Equação (2.2) (WINDERS, 2002).

$$\int B \cdot dl = B \cdot 2\pi r \quad (2.2)$$

Isso leva à conclusão que a intensidade do campo magnético é inversamente proporcional à distância do centro do condutor, de acordo com a Equação (2.3). Em outras palavras, quanto mais distante do condutor, menor será a intensidade do campo magnético.

$$B = i \cdot \frac{\mu_0}{2\pi r} \quad (2.3)$$

Dentro de um campo magnético, ao se considerar um caminho fechado, o fluxo magnético (ϕ) é determinado integrando-se a área superficial incremental (dA) com a componente perpendicular da intensidade do campo magnético B ao longo de qualquer superfície contida no caminho fechado, conforme expresso pela Equação (2.4) (WINDERS, 2002).

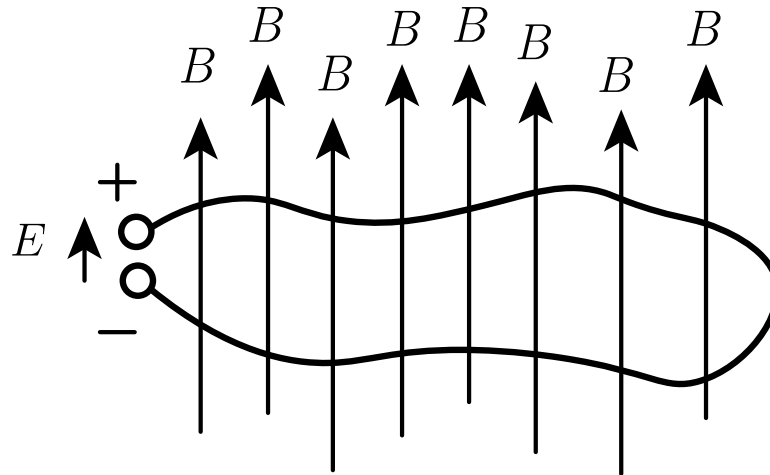
$$\phi = \int B \cdot dA \quad (2.4)$$

Nesta equação, ϕ é medido em Webers (Wb) e dA em metros quadrados (m^2).

A medida que o fluxo magnético varia com o tempo, é induzido uma tensão (E) ao redor do caminho fechado que circunda ϕ . O valor de E , em volts, é igual à taxa de variação do fluxo magnético em relação ao tempo, e é negativa, onde a direção de E segue o sentido determinado

pela regra da mão direita. A Figura 2 ilustra este fenômeno de indução magnética. Se a intensidade de B estiver diminuindo, a variação temporal de ϕ terá uma direção descendente, e a tensão será positiva no sentido da mão direita ao redor do laço fechado que engloba ϕ (WINDERS, 2002).

Figura 2 – Demonstração de uma tensão induzida (E) em um laço condutor circundando um campo magnético (B) que varia no tempo.



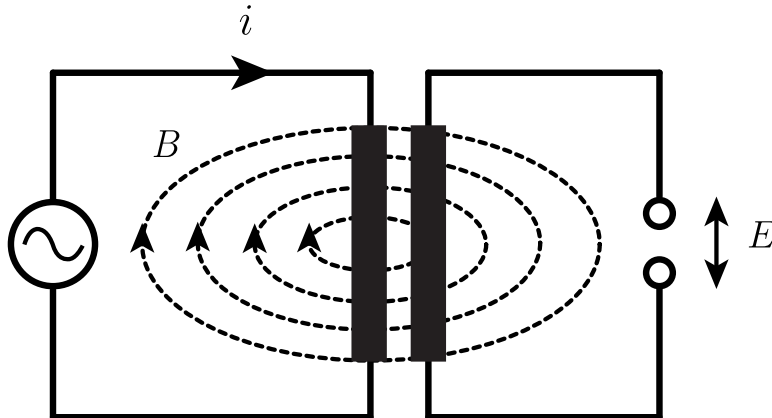
Fonte: Imagem adaptada de Winders (2002).

Após a análise das propriedades magnéticas de um condutor reto e a compreensão de como a intensidade do campo magnético varia com a distância do condutor, Equações 2.1, 2.2 e 2.3, bem como o entendimento do fenômeno de indução magnética ilustrado pela Equação 2.4, é possível avançar para aplicações práticas desses conceitos, particularmente na construção de transformadores simples.

Neste contexto, a indução magnética assume um papel crucial. Se um condutor, que transporta uma corrente variável, é colocado próximo a um segundo condutor, o campo magnético variável criado ao redor do primeiro condutor interage com o segundo. Essa interação é a chave para a indução de uma tensão no segundo condutor. Este princípio é ilustrado na Figura 3, onde o fluxo magnético, variando com a corrente no primeiro condutor, induz uma tensão no segundo condutor. Esta é a base da operação de um transformador simples, demonstrando a aplicação prática dos princípios de indução magnética.

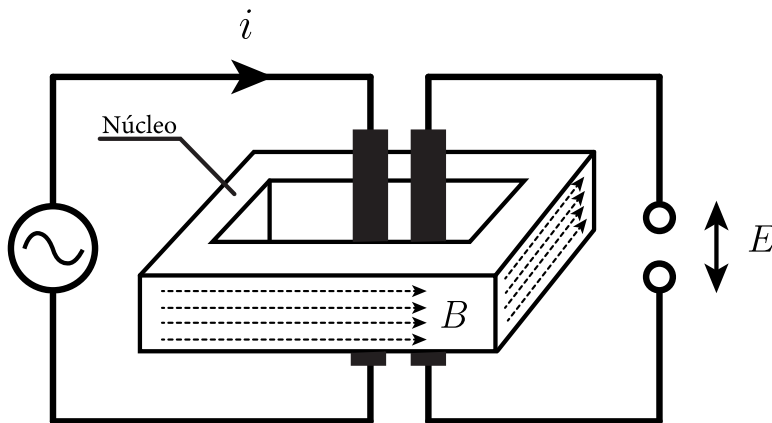
A configuração ilustrada anteriormente não é muito eficiente na transferência de energia, pois apenas uma pequena parte do fluxo magnético total que envolve o condutor primário está ligada ao circuito secundário. Para aprimorar a eficiência deste transformador rudimentar, é necessário canalizar o campo magnético de forma que a maior parte do fluxo produzido pelo condutor primário esteja ligado ao circuito secundário. Isso é alcançado ao se envolver os condutores primário e secundário com um material de núcleo magnético que tem afinidade pelo fluxo magnético. Essa modificação é demonstrada na Figura 4. Ao adicionar o núcleo magnético, praticamente todo o fluxo magnético produzido no condutor primário é transferido para o condutor secundário, aumentando significativamente a eficiência do transformador rudimentar (WINDERS, 2002).

Figura 3 – Representação da indução de tensão (E) em um condutor devido ao campo magnético (B) gerado pela corrente elétrica (i) em um transformador.



Fonte: Imagem adaptada de Winders (2002).

Figura 4 – Canalização de um campo magnético (B) através de um núcleo magnético.



Fonte: Imagem adaptada de Winders (2002).

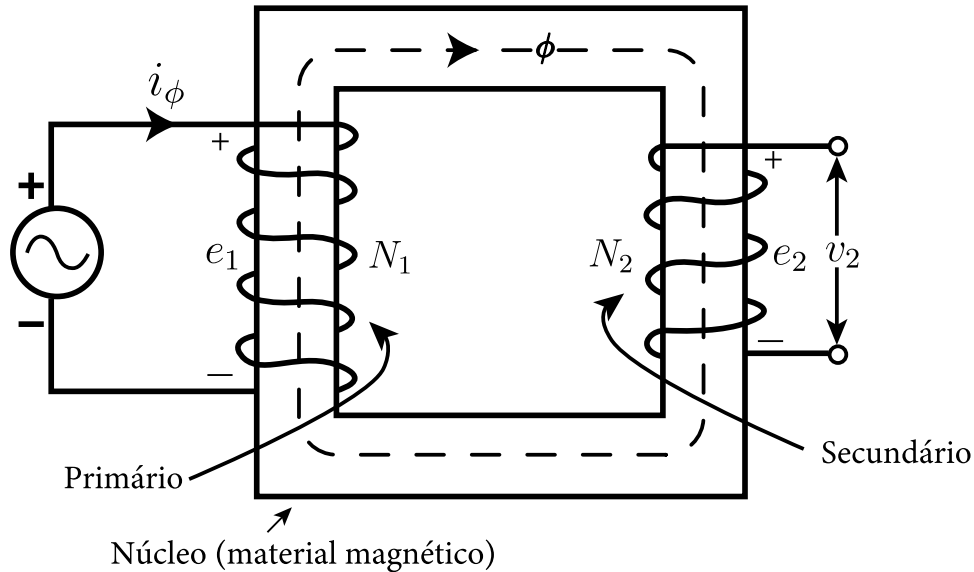
Para compreender a eficiência de materiais em transformadores e outros dispositivos magnéticos, é essencial considerar a variedade de materiais de núcleo disponíveis. A propriedade física chave nessa análise é a constante de permeabilidade (μ). De forma mais específica, a permeabilidade relativa (μ_r), representa uma medida comparativa da facilidade com que um material conduz o fluxo magnético em comparação com o vácuo. Matematicamente, μ_r , é a razão entre a constante de permeabilidade do material e μ_0 .

Os valores de μ_r para alguns materiais de núcleo magnético comuns são bastante variáveis. Por exemplo, o SiFe (Silício-Ferro) não orientado apresenta um μ_r de 400, enquanto que o SiFe orientado atinge 1500. Além disso, o NiFe 50-50 (Níquel-Ferro) orientado tem um μ_r de 2000, e o Permalloy 79, uma liga magnética, varia entre 12.000 e 100.000. Um aço siliconado orientado é capaz de conduzir o fluxo magnético 1500 vezes mais eficiente do que o vácuo. Esta eficiência na condução do fluxo magnético tem implicações significativas na construção e no desempenho de dispositivos magnéticos. É importante notar que a escolha do material do núcleo afeta diretamente a eficiência do dispositivo (WINDERS, 2002).

2.2.2 PROCESSO DE EXCITAÇÃO DE UM TRANSFORMADOR

A Figura 5 apresenta o esquema de um transformador de duas bobinas sem carga. Os terminais secundários estão abertos, enquanto o primário está conectado a uma fonte de tensão senoidal constante de frequência (f) em Hz (*Hertz*). Assume-se, para simplificação, que as resistências das bobinas são desprezíveis.

Figura 5 – Esquemático de um transformador operando sem carga.



Fonte: Imagem adaptada de Kothari e Nagrath (2010).

A bobina primária consome uma corrente alternada de valor instantâneo i_ϕ , denominada corrente de excitação, proveniente da fonte de tensão, com direção positiva conforme indicado na figura anterior. Esta corrente de excitação estabelece um fluxo no núcleo, o qual se presume estar totalmente confinado ao núcleo, ou seja, sem fluxo de dispersão. Conseqüentemente, a bobina primária possui um fluxo magnético linkado, que pode ser representado pela Equação (2.5) (KOTHARI; NAGRATH, 2010).

$$\lambda_1 = N_1 \cdot \phi \quad (2.5)$$

Onde N_1 representa o número de espiras no primário. O fluxo magnético criado pela corrente, resulta numa Força Eletromotriz (Fem) induzida no enrolamento primário e_1 (Equação (2.6)), que é calculada pela variação no tempo do fluxo magnético linkado. A lei de Lenz diz que a direção desta Fem induzida é tal que se opõe à variação que a causou, e isso é representado na Figura 5 pelos sinais de polaridade positiva e negativa (KOTHARI; NAGRATH, 2010).

$$e_1 = \frac{d\lambda_1}{dt} = N_1 \cdot \frac{d\phi}{dt} \quad (2.6)$$

Ao seguir a Lei de Kirchhoff, a tensão v_1 no enrolamento primário é igual à e_1 , assumindo que o enrolamento tem resistência desprezível. Desta forma, e_1 e, conseqüentemente, ϕ possuem

uma natureza senoidal com a mesma frequência da fonte de tensão que alimenta o transformador. O fluxo magnético pode ser expresso como uma função senoidal do tempo (Equação (2.7)) (KOTHARI; NAGRATH, 2010).

$$\phi = \phi_{\max} \cdot \sin \omega t \quad (2.7)$$

Onde w é a frequência angular, relacionado à f da fonte pela Equação (2.8).

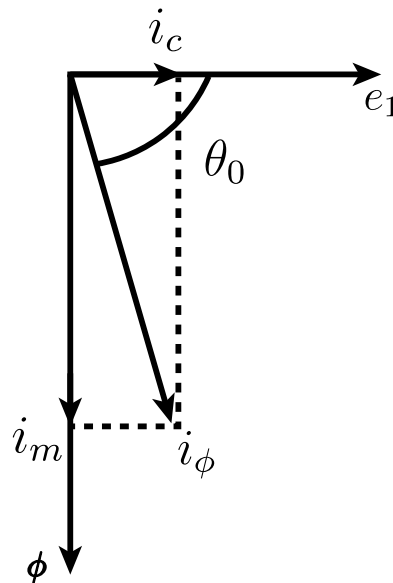
$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f \quad (2.8)$$

A Fem induzida no enrolamento primário é proporcional à taxa de mudança de fluxo magnético e pode ser escrita como (2.9).

$$e_1 = N_1 \cdot \frac{d\phi}{dt} = \omega \cdot N_1 \cdot \phi_{\max} \cdot \cos \omega t \quad (2.9)$$

Ao analisar as Equações 2.7 e 2.9, percebe-se que a Fem induzida está 90° à frente do fluxo magnético, representada no diagrama fasorial ilustrado na Figura 6.

Figura 6 – Diagrama fasorial da corrente de excitação.



Fonte: Imagem adaptada de Kothari e Nagrath (2010).

A expressão para o valor eficaz da Fem induzida é derivada da Equação 2.9, onde E_1 (Equação (2.10)) é proporcional à raiz quadrada do produto da frequência angular, o número de espiras e o fluxo magnético máximo (ϕ_{\max}) (KOTHARI; NAGRATH, 2010).

$$E_1 = \sqrt{2} \cdot \pi \cdot f \cdot N_1 \cdot \phi_{\max} = 4.44 \cdot f \cdot N_1 \cdot \phi_{\max} \quad (2.10)$$

Esta relação permite calcular o fluxo magnético máximo em termos da Fem induzida e do número de espiras do enrolamento. A resistência do enrolamento primário, mesmo quando considerada, não afeta significativamente essas relações devido à sua magnitude geralmente baixa.

Através destas equações, é possível entender que o fluxo magnético máximo em um transformador é determinado pela relação entre a tensão e a frequência da fonte que o excita. Portanto e_1 e, por conseguinte, ϕ devem ser sinusoidais com a mesma frequência da fonte de tensão.

O fluxo magnético do núcleo, também surge no enrolamento secundário, assumindo que não há fluxo de dispersão. Este fenômeno origina uma força eletromotriz induzida no secundário (e_2), que é descrita pela Equação (2.11), onde N_2 representa o número de espiras do enrolamento secundário (KOTHARI; NAGRATH, 2010).

$$e_2 = N_2 \cdot \frac{d\phi}{dt} \quad (2.11)$$

Quando o enrolamento secundário está em circuito aberto, a tensão do terminal secundário é simplesmente e_2 . A relação entre e_1 e e_2 (Equação (2.12)) é representada pela razão do número de espiras, que é designada pela letra a . Esta é a razão de transformação de tensão do transformador. De maneira similar a razão de transformação de corrente é o inverso desta relação (KOTHARI; NAGRATH, 2010).

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{N_1}{N_2} = a \quad (2.12)$$

A corrente de excitação i_ϕ deve ser suficiente para estabelecer a Fem necessária para gerar o fluxo magnético exigido pela tensão aplicada. Caso assuma-se que existe uma relação linear entre a densidade de fluxo magnético B e a intensidade de campo magnético (H), sem histerese ou saturação, a corrente de excitação será puramente senoidal e proporcional ao fluxo magnético, estando em fase com ele, como visto na Figura 6, com um atraso de θ_0 em relação à Fem induzida e_1 . Contudo, fenômenos como histereses e correntes parasitas introduzem complexidades adicionais, exigindo que a corrente de excitação i_ϕ tenha componentes de potência ativa (KOTHARI; NAGRATH, 2010).

O fenômeno de histerese é responsável pela defasagem entre a componente magnetizante i_m e a Fem induzida, gerando perdas (KOTHARI; NAGRATH, 2010). Quando o núcleo se torna saturado, a tendência é que haja um aumento substancial na distorção da corrente de excitação. Este aumento é marcado pela presença de componentes harmônicas, particularmente harmônicas ímpares. As correntes parasitas, também conhecidas como correntes de Foucault, contribuem para a complexidade desse cenário. Elas tendem a elevar a componente magnetizante i_m , reforçando a defasagem causada pela histerese e aumentando o calor dissipado pelo efeito Joule.

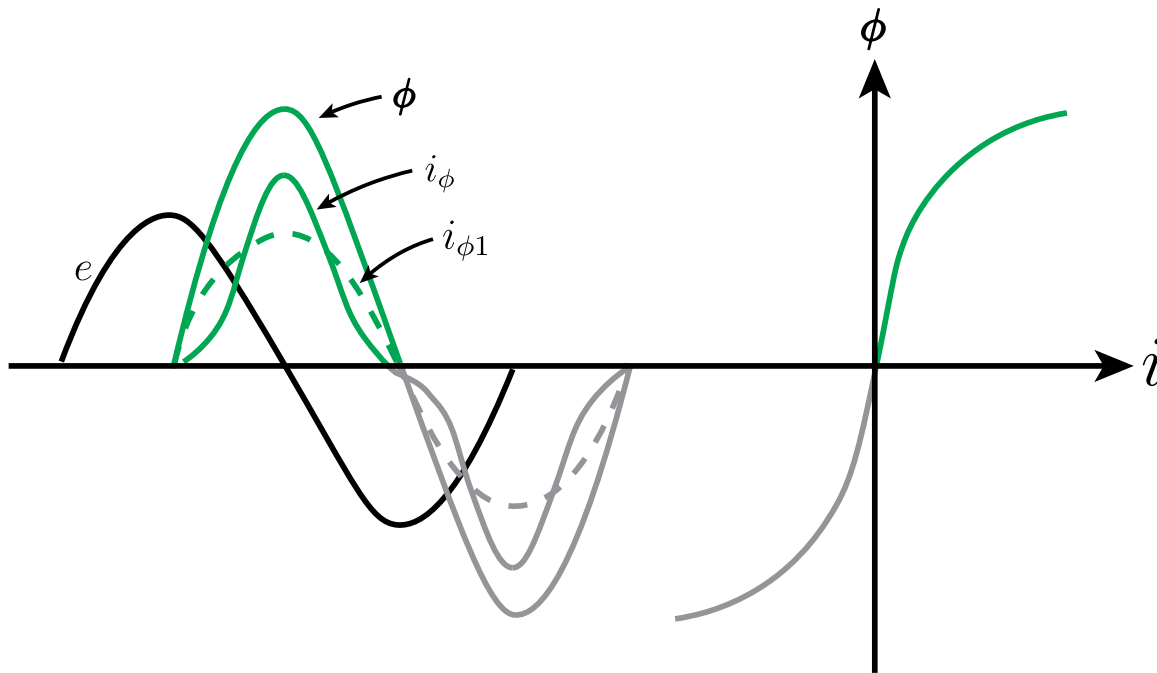
Dessa forma, o controle e a mitigação das correntes parasitas são essenciais para a eficiência dos transformadores. Em um transformador prático, busca-se manter a corrente de magnetização (i_m) em níveis baixos e as perdas no núcleo controladas, o que é facilitada pelo uso de aço-silício de alta permeabilidade em forma laminada (KOTHARI; NAGRATH, 2010).

Em relação às harmônicas na corrente de excitação, as de segunda e terceira ordem são as mais comuns neste processo de saturação. Estas têm frequências que são respectivamente, duas e três vezes maiores que a da componente fundamental. A saturação do núcleo induz

principalmente a formação de harmônica ímpares, sendo que a terceira harmônica pode variar de 35% a 40% do valor total da corrente de excitação, bem como a presença de conteúdo harmônico de 2ª ordem, que pode ser bastante significativo, atingindo até 60% da amplitude da onda fundamental (HAYWARD, 1941) (ANDERSON, 1999). Este fenômeno pode resultar em efeitos adversos nos sistemas de energia elétrica, como a distorção da tensão e corrente, além de interferir na operação de dispositivos de proteção e medição.

Observa-se na Figura 7 uma curva característica B-H sem o laço de histerese. Nota-se que a corrente de excitação, embora não senoidal, está em fase com o fluxo e é simétrica em relação a tensão E . A componente fundamental $i_{\phi 1}$ da corrente de excitação está defasada 90° em relação à tensão, e esta defasagem não causa perda de potência devido à ausência do laço de histerese, que é associado a tais perdas (SEN, 2013).

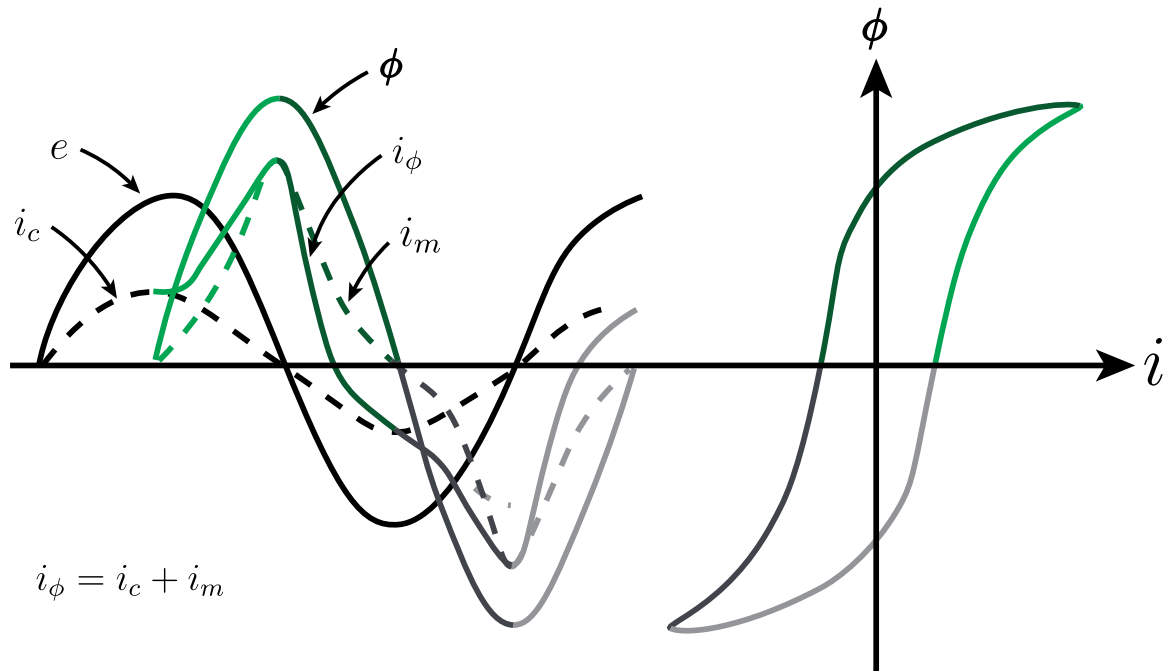
Figura 7 – Característica B-H sem o laço de histerese.



Fonte: Imagem adaptada de Sen (2013).

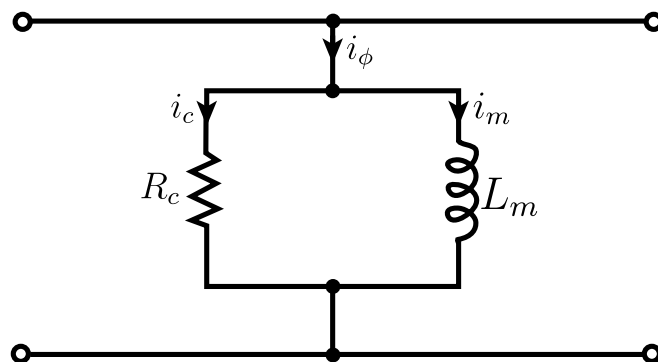
Prosseguindo com a análise para o caso de uma curva B-H com laço de histerese, ilustrado na Figura 8, a forma de i_{ϕ} é derivada da forma de onda de fluxo e da característica $\phi - i$ do núcleo. Esta corrente de excitação é não senoidal e não mantém simetria com a forma de onda de tensão. A corrente de excitação pode ser decomposta em duas componentes: i_c , em fase com a tensão e representa as perdas no núcleo, e i_m , em fase com o ϕ e simétrica em relação a tensão, indicando a magnetização do núcleo. A componente de magnetização i_m corresponde à corrente de excitação na ausência da histerese (SEN, 2013). O diagrama fasorial para esta configuração já foi apresentado na Figura 6. Assim, o enrolamento de excitação pode ser modelado por uma resistência R_C , representando as perdas no núcleo, e uma indutância de magnetização L_m , que simboliza a magnetização do núcleo, como mostrado na Figura 9.

Figura 8 – Característica B-H com o laço de histerese.



Fonte: Imagem adaptada de Sen (2013).

Figura 9 – Ramo de magnetização de um transformador.



Fonte: Autor.

Em resumo, quando uma bobina ligada a uma fonte de tensão senoidal gera um fluxo senoidal em seu núcleo, ela induz uma corrente chamada corrente de excitação. Se o núcleo ferromagnético tiver uma característica B-H não linear, essa corrente não seguirá um padrão senoidal. Desconsiderando o efeito da histerese, a corrente de excitação mantém-se em fase com o fluxo magnético e apresenta uma simetria em relação à tensão aplicada, este é um modelo ideal. Na prática, ao se levar em conta o fenômeno de histerese, percebe-se que a corrente de excitação se decompõe em duas componentes distintas: a primeira alinhada com a tensão aplicada, sugerindo perdas energéticas no núcleo devido ao aquecimento por correntes parasitas e outros efeitos; e a segunda alinhada com o fluxo magnético, refletindo a magnetização do núcleo. A interação dessas duas componentes define a eficiência e o comportamento térmico do transformador.

2.3 INRUSH

Em condições normais de operação, a corrente de excitação de um transformador é geralmente muito baixa, cerca de 2% a 5% da corrente nominal. Contudo, no momento em que um transformador de potência é energizado sem ter uma carga conectada ao seu enrolamento secundário, o enrolamento primário absorve uma corrente elevada da fonte, que possui um comportamento transitório. Essa corrente é chamada como corrente de *inrush*, ela pode ser até 10 a 30 vezes a corrente nominal do transformador (BLACKBURN; DOMIN, 2006). Apesar de ser um comportamento transitório, as vezes ela pode levar a disparos equivocados dos sistemas de proteção, como o desligamento de disjuntores quando o transformador é energizado. Compreender essa corrente é crucial para determinar as tensões máximas que podem ser aplicadas nas bobinas do transformador, bem como para projetar o sistema de proteção do transformador.

2.3.1 FUNDAMENTOS DA CORRENTE DE INRUSH

No início desta seção, foi mencionado que a corrente de excitação acontece quando o transformador é energizado, portanto deve-se considerar possibilidade de uma corrente de *inrush* ocorrer, cuja magnitude e duração são dependentes de múltiplos fatores. Um deles é o instante de chaveamento.

Considerando um transformador cujo núcleo está inicialmente desmagnetizado. A bobina primária do transformador é então conectada a uma tensão de alimentação dada pela Equação 2.13 (SEN, 2013).

$$v = \sqrt{2} \cdot V \cdot \sin \omega t \quad (2.13)$$

Nesta equação, V é o valor da tensão máxima, w é a frequência angular da fonte de alimentação, e t é o tempo. O termo $\sqrt{2}$ surge como um fator de conversão entre os valores máximos e eficazes para uma onda senoidal.

Ignorando as perdas no núcleo e a resistência da bobina primária, estabelece-se uma relação entre a tensão v e a variação do fluxo magnético no núcleo do transformador, conforme expresso pela Equação 2.14 (SEN, 2013).

$$v = N \cdot \frac{d\phi}{dt} \quad (2.14)$$

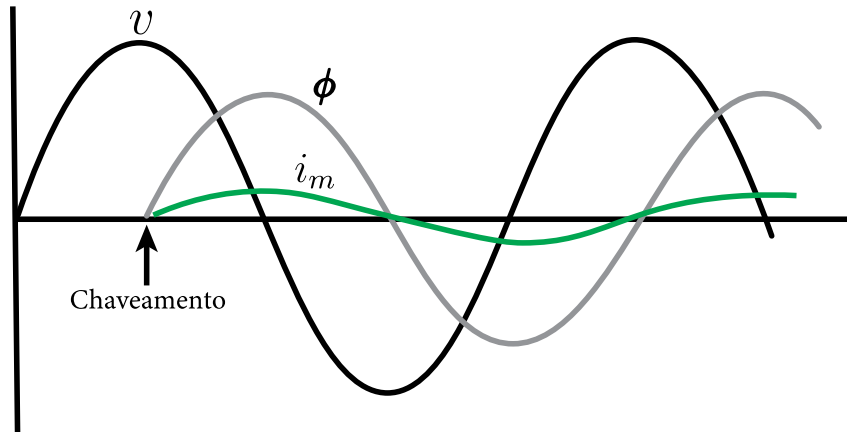
Utilizando esta relação, o fluxo magnético pode ser expresso como a integral da tensão ao longo do tempo, como indicado pela Equação 2.15 (SEN, 2013).

$$\phi = \frac{1}{N} \int v \cdot dt \quad (2.15)$$

A partir da variação do fluxo magnético dada pela Equação 2.15, há dois possíveis cenários de análise. Primeiro, o transformador é conectado quando a tensão é máxima ou mínima e segundo, o transformador é conectado quando a tensão é zero. O caso 1 é observado na Figura

2.16, é possível ver que a corrente de *inrush* é mínima, já que, o fluxo é zero. Nota-se que, neste caso, não há transiente no fluxo magnético, e a variação temporal do fluxo é descrita pela Equação 2.16. Com isso, obrigatoriamente o fluxo irá ser excitado a partir do valor zero, diminuindo consideravelmente a saturação do núcleo do transformador (SEN, 2013).

Figura 10 – Formas de onda quando a tensão é máxima.



Fonte: Imagem adaptada de Sen (2013).

$$\phi = \phi_{\max} \cdot \sin(\omega t - 90^\circ) \quad \text{para} \quad \omega t > 90^\circ \quad (2.16)$$

Onde ϕ_{\max} é calculado pela Equação 2.17.

$$\phi_{\max} = \frac{\sqrt{2} \cdot V}{\omega \cdot N} \quad (2.17)$$

Como foi visto na seção 2.2, a corrente de magnetização é determinada a partir da característica B-H do núcleo do transformador. No cenário citado, é possível observar que o sistema opera em estado estacionário desde o início.

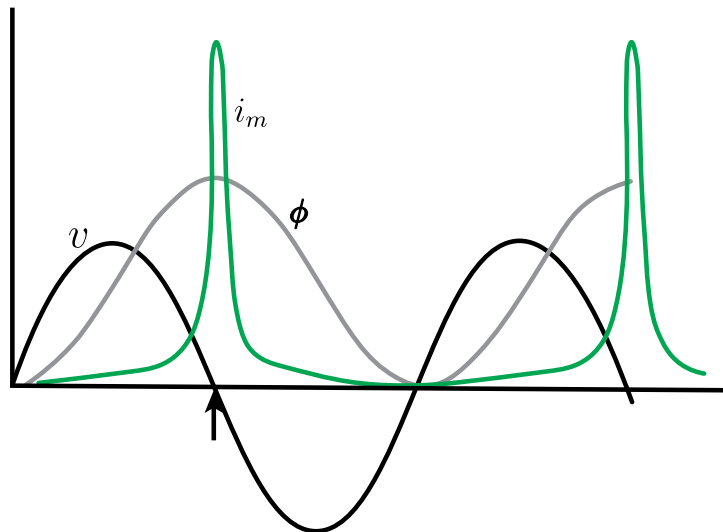
Em compensação, observando o caso 2, quando o transformador for conectado quando a tensão é zero. A partir das Equações 2.13 e 2.15, pode-se obter 2.18 para determinar o fluxo magnético (SEN, 2013).

$$\begin{aligned} \phi &= \frac{\sqrt{2} \cdot V}{N} \int_0^t \sin \omega t dt \\ &= \frac{\sqrt{2} \cdot V}{\omega \cdot N} (1 - \cos \omega t) \\ &= \phi_{\max} - \phi_{\max} \cdot \cos \omega t \end{aligned} \quad (2.18)$$

As variações no tempo da tensão, fluxo e corrente de magnetização são exibidos na Figura 11. Observa-se que o fluxo dobra e a corrente de magnetização correspondente é muito alta devido à saturação do núcleo.

Na prática, a alta corrente de partida normalmente decai rapidamente para o valor nominal em um período de alguns segundos, como demonstrado na Figura 12. Este intervalo de

Figura 11 – Formas de onda quando a tensão é zero.



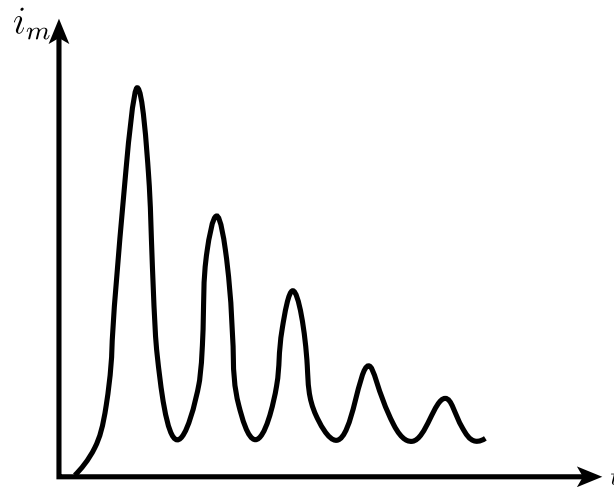
Fonte: Imagem adaptada de Sen (2013).

decaimento é influenciado principalmente pela resistência das bobinas do transformador. Além do mais, a magnitude e o período de decaimento da corrente de *inrush* podem ser afetados por vários outros fatores relacionados que segundo Agasti, Naresh e Ghosh (2016) incluem:

- A magnitude e polaridade do fluxo residual
- Tipo de conexão do transformador
- Resistência total do enrolamento primário
- Estrutura física do núcleo do transformador
- Impedância total do circuito

O material construtivo do núcleo do transformador é crucial na avaliação da corrente de *inrush* devido à curva de histerese B-H, que determina o fluxo residual (ϕ_r) presente após a desenergização do transformador. A reenergização com fluxo residual faz com que o fluxo magnético aplicado oscile em torno do valor do ϕ_r , e não de zero, levando a picos elevados que causam saturação do núcleo e resultam em uma corrente com forma de onda distorcida (BANDEIRA; SAMPAIO; PONTES, 2018).

O efeito de *inrush* é comum em situações como a energização inicial do transformador após instalação ou retorno à operação, bem como após o religamento de circuitos desativados por atuação da proteção, sendo este último o caso mais frequente em sistemas elétricos. Outras situações, como mudanças no tipo de falta externa ou a entrada em operação de um novo transformador em paralelo, também podem provocar a corrente de *inrush*. Um aspecto crítico do fenômeno de *inrush* é que ele ocorre em apenas um lado do transformador, podendo causar disparos indevidos da proteção diferencial. Dada a infinidade de combinações possíveis de fluxo

Figura 12 – Decaimento da corrente do *inrush*.

Fonte: Imagem adaptada de Sen (2013).

residual e tempos de comutação, a ocorrência da corrente de partida é altamente provável sempre que um transformador é reenergizado ou excitado. Essa corrente pode gerar tensões transitórias similares às observadas em curto-circuitos e surtos causados por raios, complicando a tarefa de distinção para o sistema de proteção (BALAMURUGAN; RATHINAM, 2017).

As principais características da corrente de *inrush* incluem a presença do ângulo morto, a natureza não senoidal e a assimetria da forma de onda, além da presença de conteúdos harmônicos de segunda ordem, usados como critério de discriminação entre faltas e correntes de partida (BALAMURUGAN; RATHINAM, 2017). Contudo, dependendo do design do transformador e do material do núcleo, podem ocorrer baixos níveis de harmônicos, exigindo técnicas alternativas para a correta distinção.

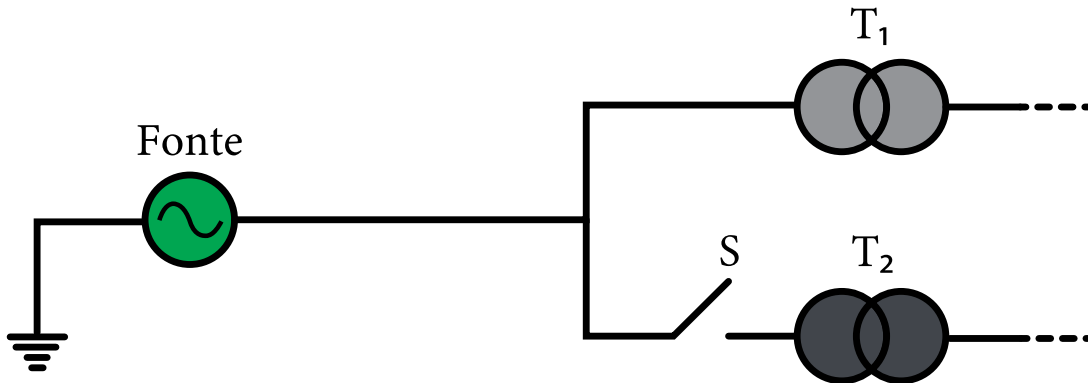
2.3.2 ENERGIZAÇÃO SOLIDÁRIA (SYMPATHETIC INRUSH)

Considerando a Figura 13, que ilustra um sistema elétrico com dois transformadores, T_1 e T_2 , conectados a uma fonte comum, é essencial discutir a proteção dos transformadores contra correntes oriundas de energizações simultâneas, fenômeno conhecido como energização solidária.

Quando um transformador já em operação, como T_1 na Figura 13, enfrente a conexão de um segundo transformador, o T_2 , ao sistema, observa-se um comportamento inusual. O T_1 pode sofrer um aumento na corrente de *inrush* devido a influência mútua entre os transformadores. Esse aumento se dá pela indução da saturação magnética no T_1 provocada pela energização do T_2 .

Segundo Nadhirah et al. (2022) a principal característica da corrente de *inrush* em situações de energização solidária não é um pico imediato, mas um crescimento gradual, com a corrente persistindo por um período mais extenso que o normal. Os fatores que influenciam esse fenômeno incluem a impedância do circuito primário, o nível de remanescência magnética dos

Figura 13 – Diagrama de um sistema elétrico com dois transformadores, T_1 e T_2 .



Fonte: Autor.

transformadores, o ângulo de fechamento da chave no circuito e a carga presente no transformador já em operação (CAO et al., 2018).

Além disso a energização solidária é mais comumente observada durante a restauração de energia do sistema do que em primeiras energizações. Isso ocorre porque a reenergização de transformadores é uma prática mais frequente, o que aumenta o risco desses eventos, especialmente considerando que a fonte pode apresentar uma resistência maior durante esse processo e o sistema pode estar em um estado mais vulnerável e menos controlado do que em uma primeira energização (NADHIRAH et al., 2022).

A Figura 14 mostra a forma de onda da corrente de *inrush* e a corrente resultante de uma energização solidária, é possível observar que elas apresentam características distintas ao longo do tempo, exibindo magnitudes diferentes e direções opostas.

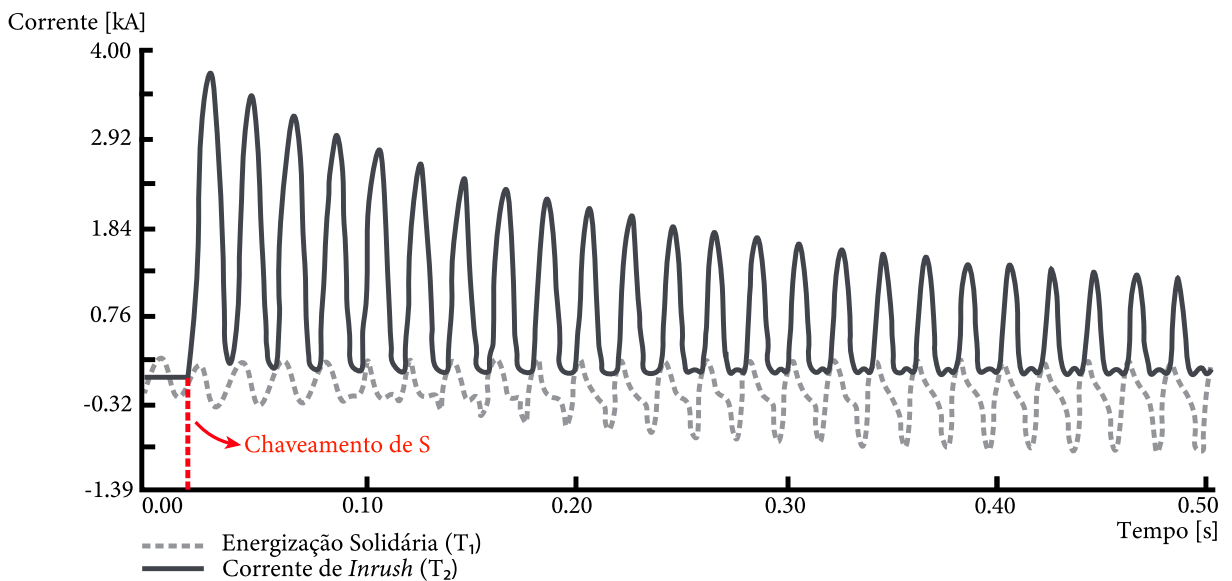
A principal preocupação diante dessas observações está na capacidade da corrente oriunda de uma magnetização mútua comprometer o funcionamento adequado dos relés de proteção, potencialmente levando a danos nos transformadores ou falhas operacionais. Quando um transformador está desenergizado e não está sob carga, o impacto da corrente de magnetização na tensão do sistema é minimizado, e a influência de outro transformador sendo energizado é negligenciável. No entanto, quando um transformador é energizado de forma esporádica, pode ocorrer uma queda notável na tensão, o que constitui um estado crítico para a estabilidade do sistema elétrico (NADHIRAH et al., 2022).

As características dessas correntes representam um desafio no desenvolvimento de sistemas de proteção adequados para transformadores operando em paralelo. Um dos obstáculos é a falta de técnicas bem difundidas na literatura que abordam os efeitos da energização solidária em transformadores. A soma das correntes de *inrush* de cada um dos transformadores pode ser erroneamente interpretada como um indicativo de curto-circuito, devido a diferenças de fase ou amplitude, o que, por sua vez, pode causar desligamentos inapropriados e interrupções desnecessárias no fornecimento de energia (SADEGHI; DAMCHI; SHIRANI, 2018). De acordo com Cao et al. (2018), o critério de bloqueio de harmônico secundário é normalmente adotado para evitar o mau funcionamento da proteção diferencial quando ocorre a energização solidária.

Em geral, quando a corrente diferencial atinge um valor entre 15% a 20% do limiar, considera-se que a corrente diferencial é causada pela energização mútua, e então a proteção é bloqueada. E o mau funcionamento ocorre geralmente após a saturação dos transformadores de corrente.

Esse fenômeno discutido tem o potencial de diminuir a vida útil dos transformadores e causar os problemas mencionados. É importante notar que a energização solidária de transformadores pode ocorrer tanto em configurações de transformadores operando em paralelo quanto em série, bem como em uma combinação de ambas as conexões.

Figura 14 – Comparação entre a Corrente de *Inrush* em T_2 e a Energização Solidária em T_1 .



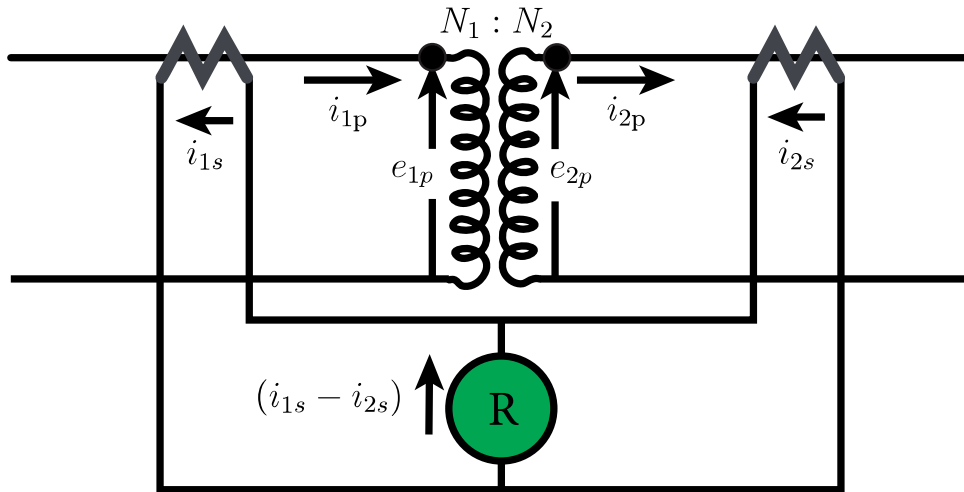
Fonte: Imagem adaptada de Sadeghi, Damchi e Shirani (2018).

2.4 PRINCÍPIOS DA PROTEÇÃO DIFERENCIAL

A proteção diferencial opera com base na comparação das correntes medidas nos lados primário e secundários de um transformador. Sob condições normais, essas correntes devem ser equivalentes. No entanto, uma discrepância significativa entre essas correntes, geralmente causada por faltas internas, faz com que o relé de proteção diferencial atue, isolando o elemento protegido através do desarme de disjuntores. Entretanto, a proteção diferencial nem sempre é precisa. Um bom exemplo, é a saturação dos transformadores de corrente durante faltas externas e condições de *inrush* que podem levar a operações indevidas do relé de proteção. Para aprimorar a precisão e evitar tais operações incorretas, foi desenvolvida a proteção diferencial percentual.

Em condições normais de funcionamento do transformador da Figura 15, a soma algébrica das correntes nas bobinas primárias e secundárias deve corresponder a força magnetomotriz (FMM) requerida para gerar o fluxo magnético adequado no núcleo do transformador. Devido ao pequeno espaço de entreferro de ar presente no núcleo, a influência da FMM é quase imperceptível, o que significa que, para um transformador de potência operando normalmente,

Figura 15 – Esquemático da proteção diferencial.



Fonte: Imagem adaptada de Horowitz, Phadke e Henville (2022).

essa contribuição da FMM pode ser considerada insignificante. E a relação entre as correntes do primário e secundário pode ser escrita pela Equação 2.19 (HOROWITZ; PHADKE; HENVILLE, 2022).

$$N_1 \cdot i_{1p} = N_2 \cdot i_{2p} \quad (2.19)$$

Quando transformadores de corrente com razões de espiras $1 : n_1$ e $1 : n_2$ são utilizados nos lados primário e secundário, respectivamente, em condições normais, as correntes nas bobinas secundárias dos TCs estão relacionadas pela Equação 2.20 (HOROWITZ; PHADKE; HENVILLE, 2022).

$$N_1 \cdot n_1 \cdot i_{1s} = N_2 \cdot n_2 \cdot i_{2s} \quad (2.20)$$

Ao selecionar corretamente os TCs, é possível alinhar as relações das espiras de modo que $N_1 n_1$ se iguale a $N_2 n_2$ resultando em i_{1s} igual a i_{2s} em um transformador operando normalmente. Contudo, em situações onde ocorre uma falta interna, esta igualdade é comprometida, e a discrepância entre i_{1s} e i_{2s} aumenta significativamente, sendo proporcional à magnitude da corrente de falta. A corrente diferencial resultante será expressa pela Equação 2.21 (HOROWITZ; PHADKE; HENVILLE, 2022).

$$I_d = i_{1s} - i_{2s} \quad (2.21)$$

Para a implementação efetiva de um relé diferencial, diversos fatores práticos devem ser considerados como as disparidades nas razões de espiras dos TCs, juntamente com os erros de transformação e as variações causadas pelos comutadores de tap do transformador, podem gerar correntes diferenciais durante condições normais de operação. Uma solução eficaz para essas questões é o emprego de um relé diferencial de porcentagem. Neste tipo de abordagem, a

corrente diferencial deve exceder uma porcentagem fixa da corrente de restrição, onde a corrente de restrição é definida como a média das correntes primária e secundária e é dada pela Equação 2.22 (HOROWITZ; PHADKE; HENVILLE, 2022).

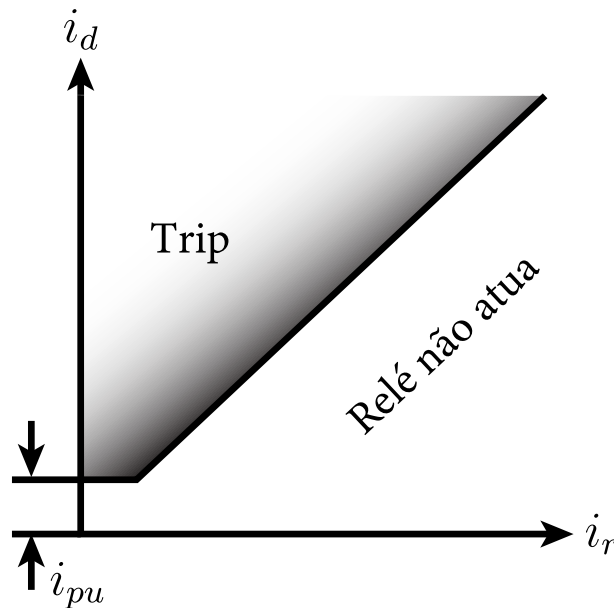
$$i_r = \frac{i_{1s} + i_{2s}}{2} \quad (2.22)$$

Essa corrente, conhecida como corrente de restrição, originou-se no design dos relés eletromecânicos, onde ele gerava um torque de restrição no disco móvel, enquanto a corrente diferencial produzia o torque de operação. O relé era acionado pela Equação 2.23 (HOROWITZ; PHADKE; HENVILLE, 2022).

$$i_d \geq K \cdot i_r \quad (2.23)$$

Onde K representa a inclinação da característica diferencial de porcentagem. Quanto menor a porcentagem da inclinação mais sensível é o relé e esta inclinação determina a zona de atuação. A Figura 16 mostra a curva de sensibilização do relé, onde acima da inclinação ocorre o trip do relé e abaixo não.

Figura 16 – Curva de sensibilização do relé.



Fonte: Imagem adaptada de Horowitz, Phadke e Henville (2022).

A alta sensibilidade dos relés diferenciais de porcentagem na detecção de falhas internas, mesmo quando as correntes de falha são baixas é um fator determinante na proteção dos transformadores. Estes relés podem ser de tipo fixo ou variável, oferecendo um equilíbrio entre sensibilidade e segurança. Eles ajustam sua atuação de acordo com as condições de corrente de passagem e falha. As correntes de restrição e operação são cuidadosamente calibradas, assegurando que o relé atue apropriadamente, reduzindo a incidência de operações indevidas. (BLACKBURN; DOMIN, 2006).

2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este Capítulo apresenta um entendimento sobre os conceitos básicos para o entendimento do fenômeno da corrente de *inrush*. Discutiu-se a origem do fenômeno como um efeito de magnetização inerente à operação dos transformadores e identificaram-se os fatores críticos que influenciam sua forma e magnitude. Adicionalmente, o Capítulo aborda os fundamentos do transformador e da proteção diferencial, criando uma base para a introdução dos conceitos que serão detalhados nos próximos Capítulos.

3 MÉTODOS PARA DETECÇÃO DE CORRENTES DE *INRUSH* ANALISADOS

3.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Este Capítulo detalha alguns métodos de detecção das correntes de *inrush* encontrados na literatura, os quais foram implementados para a realização deste estudo. São apresentados 3 métodos, com uma descrição de seu funcionamento. Para auxiliar a compreensão, são incluídas equações e fluxogramas explicativos ao longo do Capítulo, permitindo uma melhor visualização dos processos envolvidos na detecção das correntes de magnetização.

3.2 MÉTODO BASEADO NA DIMENSÃO DA CAIXA (MDC)

Proposto por Gong et al. (2017), o método baseado na dimensão da caixa explora a propriedade fundamental dos fractais: a auto-similaridade em diversas escalas. Esse princípio permite a análise de sinais, que exibem características únicas, conhecidas como singularidades. Tais sinais possuem uma propriedade especial, a auto-similaridade estatística, essencial para a análise fractal.

A singularidade de um sinal pode ser quantificada pelo expoente de Lipschitz (α), que desempenha um papel crucial na compreensão do comportamento do sinal em pontos específicos. Considerando uma função $f(t)$, onde t representa o tempo, e que o expoente de Lipschitz varia entre 0 e 1, essa configuração revela como a função se aproxima de pontos singulares, conforme descrito pela Equação 3.1 (GONG et al., 2017).

$$|f(t_0 + h) - f(t_0)| \leq A \cdot h^\alpha \quad (3.1)$$

Nessa Equação, t_0 representa um ponto específico no tempo, h um incremento de tempo e A uma constante. O valor de α sugere que a função é diferenciável até certo ponto, variando a natureza da singularidade com o valor de α . Por exemplo, $\alpha = 1$ indica que a função é diferenciável, embora com limitações na derivada. Se α está entre 0 e 1, $f(t)$ possui uma singularidade em t_0 e quando $\alpha = 1$, $f(t)$ é descontínua e limitada em t_0 . O expoente de Lipschitz reflete o grau de auto-similaridade do sinal, com valores mais altos indicando maior similaridade e propriedades fractais evidentes. A dimensão fractal relaciona-se com α , fornecendo uma métrica para quantificar suas características fractais (GONG et al., 2017).

Utilizando a dimensão da caixa (D), o autor aborda sua aplicabilidade em sinais discretos unidimensionais, iniciando com a criação de uma grade de coordenadas no plano dos dados, como ilustrado na Figura 17. O tamanho da caixa é determinado pelo inverso da frequência de amostragem do sinal (f), e o número de interseções de uma grade de tamanho δ pode ser calculada conforme a Equação 3.2

$$N_\delta(F) = \frac{1}{\delta} \sum_{i=1}^n |x_i - x_{i+1}| \quad (3.2)$$

Onde x_i e x_{i+1} representam pontos consecutivos no sinal, e n é o número total de pontos analisados. A partir daí, o tamanho da grade é aumentado para 2δ , e calculam-se as interseções utilizando (3.3).

$$N_{2\delta}(F) = \frac{1}{2\delta} \sum_{i=1}^{n/2} (\max(x_{2i-1}, x_{2i}, x_{2i+1}) - \min(x_{2i-1}, x_{2i}, x_{2i+1})). \quad (3.3)$$

Neste processo, é avaliado a dispersão dos pontos do sinal em grupos de três amostras, comparando os valores máximos e mínimos dentro de cada grupo.

A dimensão da caixa D é calculada pela diferença entre os logaritmos dos números de interseções para grades de tamanho δ e 2δ , ajustada pela mudança proporcional na escala do tamanho da grade. Essa relação é estabelecida pela Equação 3.4, a qual serve para determinar D .

$$D = \frac{\lg(N_{\delta}(F)) - \lg(N_{2\delta}(F))}{\lg \delta^{-1} - \lg(2\delta)^{-1}} \quad (3.4)$$

Portanto, D possibilita a identificação e diferenciação entre sinais com base em sua complexidade, facilitando a análise em diversas aplicações, como na caracterização de padrões em sinais de correntes. Na Figura 18, observa-se o fluxograma do algoritmo da dimensão da caixa. A detecção do *inrush* ocorre quando pelo menos dois valores de D , observados nas três fases, são menores que um critério, fixado em 1,02. Entretanto, esse valor não foi o mesmo utilizado pelo autor original, dado que o sistema de teste é diferente e, nas diversas simulações realizadas, ele apresentou o melhor desempenho como resposta.

Figura 17 – Definição das caixas.

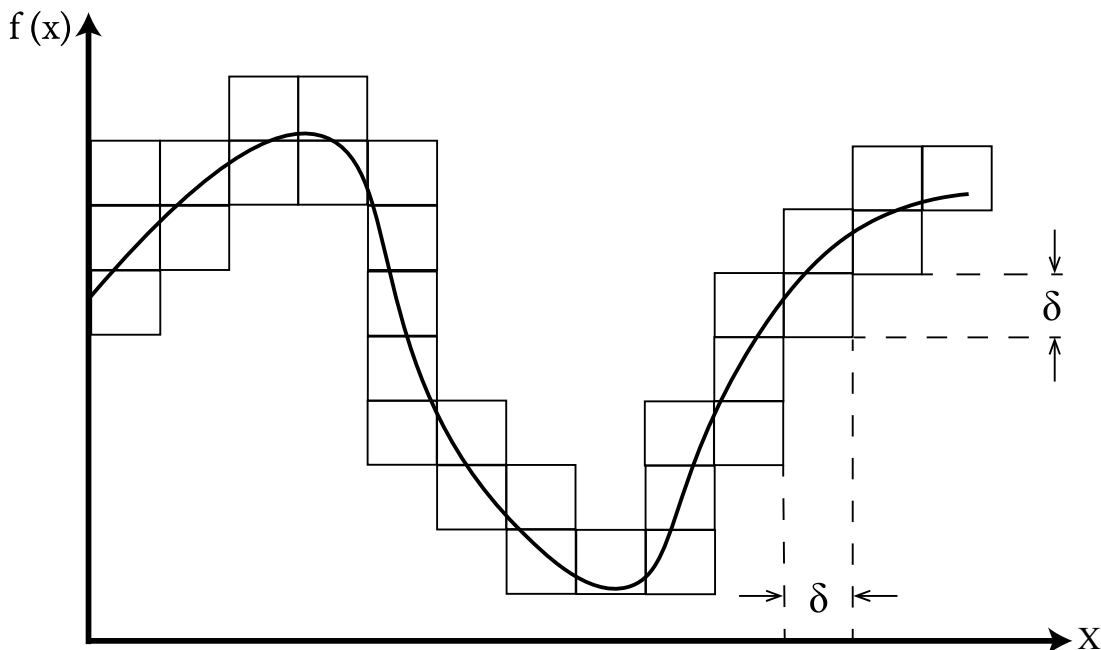
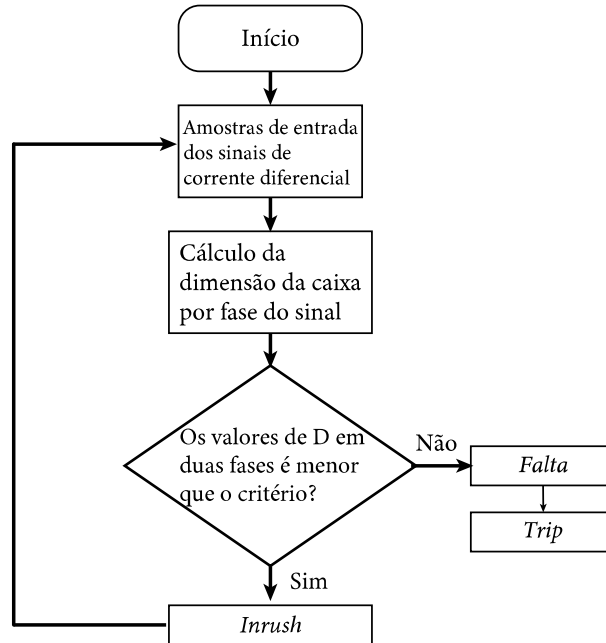


Figura 18 – Fluxograma do algoritmo da dimensão da caixa.



Fonte: Imagem adaptada de Gong et al. (2017).

3.3 MÉTODO DO TEO (MTEO)

O método proposto por Hasheminejad (2022), utiliza o operador de sinal não-linear, conhecido como TEO, o qual é uma ferramenta que pode extrair a energia de um sinal de forma rápida e precisa. Para entender como o TEO funciona, pode-se considerar um sinal representado por $x(t)$. Este sinal pode ser decomposto em diferentes componentes usando a Equação 3.5, onde a_i , ω_i , σ_i e ϕ_i representam a amplitude, frequência, amortecimento e fase de cada componente do sinal, respectivamente (HASHEMINEJAD, 2022).

$$x(t) = \sum_i A_i(t) \cdot \cos(\Theta_i(t)) = \sum_i a_i \cdot e^{\sigma_i t} \cdot \cos(\omega_i(t)t + \phi_i) \quad (3.5)$$

A Equação 3.6 define a forma contínua do TEO, onde $\psi_c[x(t)]$ é uma medida da energia do sinal. Ela é calculada a partir da primeira e segunda derivadas do sinal $x(t)$.

$$\psi_c[x(t)] = \left[\frac{dx(t)}{dt} \right]^2 - x(t) \cdot \frac{d^2x(t)}{dt^2} \quad (3.6)$$

Além disso, o TEO pode ser aplicado a sinais discretos amostrados, como indicado pela Equação 3.7. Aqui, $\psi_d[x(n)]$ representa a energia do sinal discreto e $x(n)$ são as amostras do sinal. A Equação 3.7 mostra que o TEO considera três amostras consecutivas do sinal para calcular sua energia, sendo especialmente útil para detectar mudanças incomuns ou componentes de alta frequência no sinal de corrente diferencial (HASHEMINEJAD, 2022).

$$\psi_d[x(n)] = x^2(n) - x(n-1)x(n+1) \quad (3.7)$$

Após detectar uma sobrecorrente, o algoritmo do TEO inicia o processo de análise do sinal. Em um sistema com frequência de 60 Hz, como utilizado no sistema teste que será posteriormente discutido, um ciclo completo do sinal foi selecionado para garantir resultados mais precisos, diferentemente do algoritmo proposto pelo autor, o qual utiliza apenas um quarto de ciclo para uma frequência de amostragem de 10 kHz.

Uma vez que o sinal foi capturado, o algoritmo inicia o processo de escalonamento dos valores das amostras registradas, de forma a normalizá-los entre 0 e 1. As formulações para este processo de escalonamento são definidas pelas Equações 3.8, 3.9 e 3.10.

$$SC = 1 / (DC_{\max} - DC_{\min}) \quad (3.8)$$

$$DC'_i = DC_i - DC_{\min} \quad (3.9)$$

$$DC''_i = SC \times DC'_i \quad (3.10)$$

Onde SC é o coeficiente de escalonamento, DC_i representa a i -ésima amostra da corrente diferencial antes do processo de escalonamento, e DC''_i é a i -ésima amostra da corrente diferencial escalonada. DC_{\min} e DC_{\max} são os valores mínimo e máximo registrados da corrente diferencial, respectivamente. Após este processo de escalonamento, o TEO é empregado nos sinais normalizados para identificar e extrair componentes de alta frequência, utilizando a Equação 3.7, previamente mencionada.

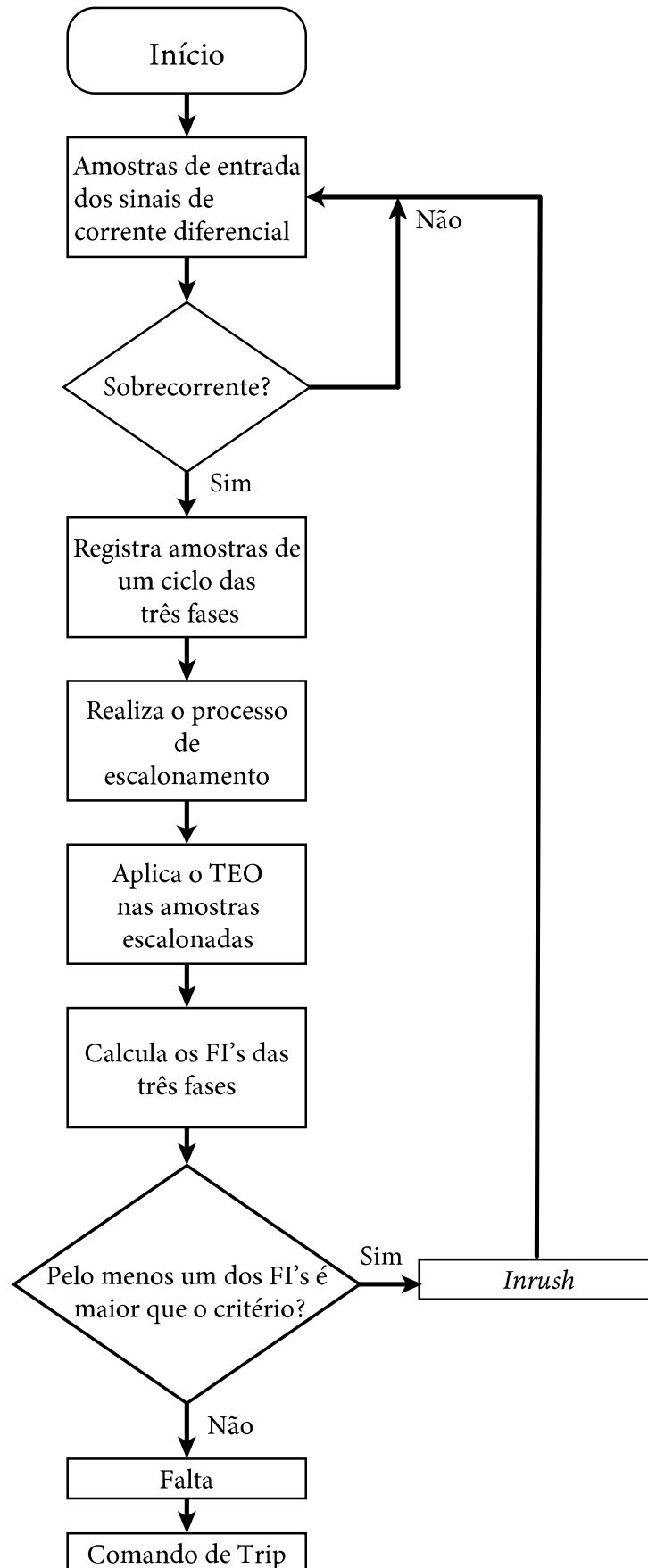
A partir disso, para identificar essas componentes de alta frequência dos sinais de corrente diferencial, o algoritmo aplica um identificador de flutuações (FI) na saída do TEO, destinado a quantificar a presença de componentes de alta frequência nas três fases. A Equação 3.11 descreve o cálculo do FI (HASHEMINEJAD, 2022).

$$FI = \sum_{n=1}^{N-1} |X_{n+1} - X_n| \quad (3.11)$$

Nesta equação, N representa o número total de amostras na saída do TEO, enquanto X_n denota o valor de saída do TEO para a n -ésima amostra. O FI é um parâmetro numérico que reflete as flutuações na saída do TEO (HASHEMINEJAD, 2022). Na Figura 19, é possível ver o fluxograma do algoritmo.

Na fase do fluxograma onde o algoritmo avalia os FI 's, a decisão subsequente depende da comparação desses valores com um limiar pré-definido, o qual é essencial para determinar a presença da corrente de *inrush* que pode afetar a decisão da proteção diferencial. Para o sistema teste em questão, estabeleceu-se o valor do critério em 0,2. Este valor, contudo, não é fixo e pode sofrer variações conforme especificidades do sistema em teste, como a frequência e outros parâmetros elétricos.

Figura 19 – Fluxograma do TEO.



3.4 MÉTODO BASEADO NOS MODOS DE CORRELAÇÃO WAVELET (MCW)

O algoritmo proposto por Guillén et al. (2016b), emprega a matriz de correlação Wavelet para diferenciar entre as condições de falta e *inrush* no contexto da proteção diferencial de transformadores. Inicialmente, os sinais de corrente são adquiridos e processados. Em seguida, as correntes diferenciais são normalizadas e suas respectivas matrizes Wavelet são elaboradas por meio da Transformada Wavelet Discreta (TWD).

A TWD é calculada conforme a Equação 3.12, que define a transformada da forma contínua, onde a representa o parâmetro de escala relativo à frequência, e b é o parâmetro de translação no tempo do sinal $f(t)$ e $\psi_{a,b}(t)$ é a Wavelet mãe escolhida. Para sinais discretos, os parâmetros a e b assumem valores discretos 2^j e $i2^j$, respectivamente. Assim, a TWD em sua forma discreta é definida pela Equação 3.13 (GUILLÉN et al., 2016b).

$$\text{WT}(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} t(t) \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \quad (3.12)$$

$$\text{DWT}(j, i) = 2^{-j/2} \sum_n f(n) \psi \left(2^{-j} n - i \right) \quad (3.13)$$

Os coeficientes da TWD são obtidos a partir de operações de filtragem e são divididos em coeficientes de aproximação (cA) e de detalhe (cD). Os coeficientes produzidos são utilizados para formar uma matriz Wavelet, que é preenchida com cA_j e cW_j de cada escala. A dimensão dessa matriz será de $(J + 1, N)$, onde J é o nível de decomposição predefinido e N é o comprimento do sinal. Entretanto, para determinar as características produzidas pelas correntes de *inrush* e de uma falta, a matriz Wavelet é analisada utilizando sua matriz de correlação e autovalores, sendo estas examinadas por meio da Equação 3.14.

$$\mathbf{Y} = \frac{\mathbf{M} \times \mathbf{M}^T}{n} \quad (3.14)$$

Nessa equação, n representa o número total de amostras, fornecendo uma matriz $Y(J + 1, J + 1)$ que armazena informações de frequência do sinal em análise. Avançando no processo, são computadas três matrizes de correlação, Y_1 , Y_2 e Y_3 . Estas matrizes individuais são sintetizadas para formar uma matriz de correlação Wavelet total (Y_T), conforme a Equação 3.15, que é responsável por conter todas as informações relevantes sobre cada escala de frequência.

$$\mathbf{Y}_T = \frac{\sum_{i=1}^3 n \mathbf{Y}_i}{3} \quad (3.15)$$

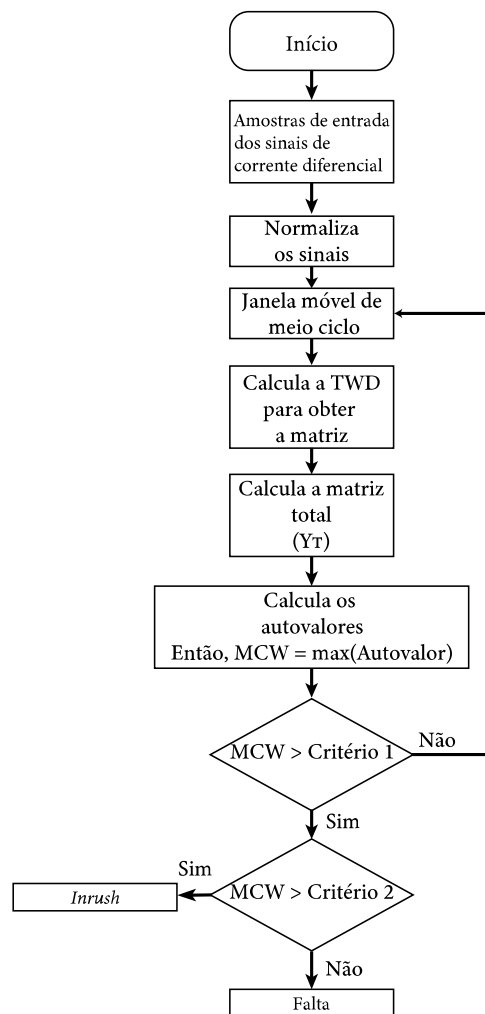
Além disso, os modos presentes na matriz Y_T são definidos pelos autovalores desta matriz, conforme a Equação 3.16. Onde L representa a matriz de autovetores e Λ é a matriz diagonal de autovalores, expressa pela Equação 3.17. Os maiores autovalores obtidos definem os Modos de Correlação Wavelet (MCW), os quais são comparados com limiares previamente definidos para permitir a correta distinção entre as correntes. Esses limiares — critério 1 igual a

0,000001 e critério 2 igual a 2 — foram determinados empiricamente com base no sistema-teste utilizado neste Trabalho. Na Figura 20, é possível observar o fluxograma da técnica.

$$\mathbf{Y}_T = \mathbf{L}\mathbf{\Lambda}\mathbf{T} \quad (3.16)$$

$$\mathbf{\Lambda} = \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \lambda_{r-1} & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_r \end{pmatrix} \quad (3.17)$$

Figura 20 – Fluxograma do MCW.



Fonte: Imagem adaptada de Guillén et al. (2016b).

3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste Capítulo, são descritos os métodos para identificação das correntes de *inrush* encontrados na literatura, utilizados para a comparação de seus desempenhos. Nos Capítulos subsequentes, será apresentado o novo método proposto, incluindo sua fundamentação teórica e implementação. A apresentação dos resultados das simulações também será realizada nos próximos Capítulos, com a devida descrição das configurações do sistema de teste, abrangendo as condições de energização do transformador e a ocorrência de faltas.

4 MÉTODO PROPOSTO PARA IDENTIFICAÇÃO DA CORRENTE DE *INRUSH* BASEADO NA TRANSFORMADA WAVELET SINCRONIZADA (TWS) E *BAG OF FEATURES* (BOF)

4.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Este Capítulo apresenta um método para identificação das correntes de *inrush* em transformadores de potência, baseado na combinação da Transformada Wavelet Sincronizada (TWS) com o algoritmo de classificação visual conhecido como *Bag of Features* (BoF), denominado Detecção de *Inrush* por Processamento de Imagens (DIPI). A proposta visa explorar a representação visual dos sinais de corrente diferencial por meio dos espectrogramas de frequência gerados pela TWS, ou seja, transformando sinais temporais em imagens tempo-frequência. A partir dessas imagens, o BoF é empregado para extrair características que possibilitam a correta distinção entre eventos de magnetização e situações de falta.

Antes de apresentar os detalhes do método proposto, torna-se necessário compreender os fundamentos básicos da TWS e do BoF, uma vez que ambos são essenciais para a estruturação da abordagem. Os algoritmos foram implementados no ambiente MATLAB®, utilizando as bibliotecas nativas para a TWS e o BoF. Esses recursos foram empregados tanto na geração dos espectrogramas quanto nas etapas de treinamento e validação do modelo. As correntes diferenciais analisadas foram obtidas por meio de simulações no software PSCAD, considerando diferentes condições operacionais do sistema.

4.2 TRANSFORMADA WAVELET SINCRONIZADA (TWS)

A análise de sinais que variam no tempo representa um desafio em engenharia e ciências aplicadas, especialmente quando se trata de sinais compostos por múltiplas componentes com características espectrais variáveis. Nesse contexto, a Transformada Wavelet Contínua (TWC), conhecida em inglês como *Continuous Wavelet Transform* (CWT), é uma ferramenta versátil para essa análise, permitindo uma resolução adaptativa ao longo do sinal por meio da dilatação e translação de uma função base chamada Wavelet mãe (DAUBECHIES; MAES, 1996).

Apesar das vantagens da TWC em relação aos métodos clássicos, como a Transformada de Fourier, ela ainda sofre com efeitos de borramento espectral e vazamento de energia entre escalas, dificultando a interpretação precisa dos componentes do sinal (SIFUZZAMAN; ISLAM; ALI, 2009). Para mitigar essas limitações, foi desenvolvida TWS, que incorpora um processo de realocação espectral após o processamento da TWC. Essa técnica concentra a energia em torno das frequências da janela atual, resultando em uma visualização mais nítida e detalhada.

Inicialmente desenvolvida para a análise de sinais auditivos, a TWS integra a família dos métodos de realocação tempo-frequência, os quais visam aprimorar a nitidez das representações ao reposicionar a energia do sinal com base em comportamentos locais da transformada original (DAUBECHIES; MAES, 1996).

No caso da TWS, o processo parte da aplicação da TWC, definida conforme a Equação

4.1.

$$W_c(a, b) = \int s(t) \frac{1}{\sqrt{a}} \psi \left(\frac{t-b}{a} \right) dt, \quad (4.1)$$

Na Equação 4.1, $W_c(a, b)$ representa o coeficiente da TWC do sinal $s(t)$, avaliado para uma dada escala $a > 0$ e translação temporal $b \in \mathbb{R}$. Esses coeficientes quantificam a correlação local entre o sinal analisado e versões dilatadas e transladadas da Wavelet mãe. O termo $s(t)$ refere-se ao sinal original no domínio do tempo, enquanto $\psi(t)$ é a Wavelet mãe.

A expressão $\frac{1}{\sqrt{a}} \psi \left(\frac{t-b}{a} \right)$ corresponde à Wavelet após ser escalada pela razão a e transladada pelo tempo b . A escala a está associada à frequência: valores menores de a detectam componentes de alta frequência do sinal, enquanto valores maiores estão associados a componentes de baixa frequência. A translação b , por sua vez, desloca a Wavelet ao longo do tempo, o que permite a análise local do sinal.

Ao aplicar a TWC a um sinal harmônico puro, como o da Equação 4.2, o resultado da transformada se apresenta concentrado ao redor de uma determina escala a , associada à frequência dominante do sinal. No entanto, devido à forma da Wavelet, essa energia é dispersa ao longo de uma faixa contínua de escalas, o que pode dificultar a identificação precisa da frequência instantânea (DAUBECHIES; LU; WU, 2011).

$$s(t) = A \cos(\omega t). \quad (4.2)$$

Apesar disso, o comportamento oscilatório da transformada em relação ao tempo b ainda conserva informações sobre a frequência. Com base nisso, Auger e Flandrin (1995) propuseram a extração da frequência instantânea da $W_c(a, b)$, utilizando uma derivada da fase da transformada em relação ao tempo para extrair a frequência instantânea candidata $\omega(a, b)$, que pode ser definida conforme a Equação 4.3 (DAUBECHIES; LU; WU, 2011).

$$\omega(a, b) = -i (W_c(a, b))^{-1} \frac{\partial W_c(a, b)}{\partial b}, \quad (4.3)$$

Onde o operador $\frac{\partial}{\partial b}$ denota a derivada parcial em relação à variável temporal b , e i representa a unidade imaginária. Essa expressão relaciona a taxa de variação da fase dos coeficientes da TWC com a frequência predominante no tempo b e escala a .

A partir dessa estimativa de $\omega(a, b)$, Daubechies e Maes (1996) fizeram uma análise e propuseram a técnica de reconcentração espectral conhecida como Transformada Wavelet Sincronizada. Essa abordagem transfere a energia dos coeficientes obtidos por meio da TWC, originalmente distribuídos no plano tempo-escala, para o plano tempo-frequência. O processo de realocação é definido pela Equação 4.4 (DAUBECHIES; LU; WU, 2011).

$$T_s(\omega, b) = (\Delta\omega)^{-1} \sum_{a_k: |\omega(a_k, b) - \omega| \leq \Delta\omega/2} W_c(a_k, b), a_k^{-3/2}, (\Delta a_k), \quad (4.4)$$

Na Equação 4.4, $T_s(\omega, b)$ representa o coeficiente da Transformada Wavelet Sincronizada no tempo b e na frequência realocada ω . Os valores a_k correspondem aos pontos discretos da escala

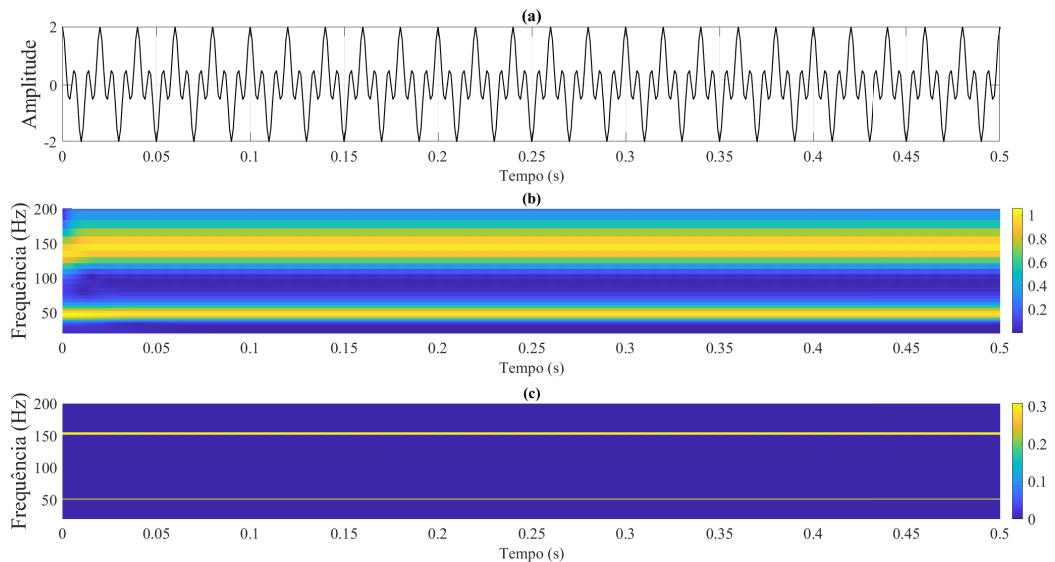
nos quais a TWS foi avaliada, enquanto Δa_k representa o incremento entre escalas consecutivas. O parâmetro $\Delta\omega$ define a largura de banda de frequência utilizada para a realocação, determinando a resolução espectral da representação sincronizada. A condição $a_k : |\omega(a_k, b) - \omega| \leq \Delta\omega/2$ estabelece uma janela de tolerância ao redor da frequência alvo ω , de modo que apenas os coeficientes cuja frequência instantânea $\omega(a_k, b)$ que estiverem dentro dessa faixa contribuirão para a soma (DAUBECHIES; LU; WU, 2011).

Esse procedimento conhecido como compressão sincronizada, do inglês *synchrosqueezing*, permite concentrar a energia ao redor da frequência instantânea correspondente, gerando uma representação tempo-frequência mais precisa. Além disso, mesmo com essa nova realocação, é possível a reconstrução do sinal original (DAUBECHIES; LU; WU, 2011). Mais detalhes sobre a TWS podem ser encontrados em (AUGER; FLANDRIN, 1995), (DAUBECHIES; MAES, 1996) e (DAUBECHIES; LU; WU, 2011).

Na Figura 21 é apresentada a análise tempo-frequência de um sinal composto por duas componentes harmônicas de frequências distintas, conforme definido em (4.5).

$$s(t) = \cos(2\pi \cdot 50t) + \cos(2\pi \cdot 150t) \quad (4.5)$$

Figura 21 – Comparação entre a TWC e a TWS. (a) Sinal da Equação 4.5. (b) Transformada Wavlet Contínua. (c) Transformada Wavelet Sincronizada.



Fonte: Autor.

Na Figura 21(a) é possível observar o sinal original no domínio do tempo. E logo abaixo, na Figura 21(b) o espectrograma obtido por meio da TWC, enquanto a Figura 21(c) apresenta a mesma análise utilizando a TWS.

A TWC permite observar a presença das componentes harmônicas do sinal nas bandas próximas a 50 Hz e 150 Hz. No entanto, a energia associada a cada componente se encontra

espalhada ao longo de uma faixa de frequências adjacentes. Esse fenômeno é conhecido como borramento espectral e é uma consequência direta da natureza da Wavelet mãe utilizada, que introduz uma resolução limitada no domínio da frequência. Como resultado, a apresentação fornecida pela TWS aplica um processo de realocação espectral aos coeficientes obtidos pela TWC, concentrando a energia ao redor das frequências instantâneas estimadas a partir da variação da fase dos coeficientes, promovendo uma concentração da energia nas frequências de 50 Hz e 150 Hz, as quais se apresentam como linhas finas e bem definidas no espectro.

4.3 BAG OF FEATURES (BOF)

A classificação de imagens é um campo essencial da visão computacional que visa identificar objetos ou categorias presentes em imagens digitais. Essa tarefa pode ser realizada por meio de algoritmos que extraem, codificam e interpretam padrões visuais. Dentre as diversas técnicas utilizadas para este fim, tem-se o método Bag of Features (BoF). Essa abordagem consiste em representar imagens como coleções não ordenadas de características locais, análogas às palavras em documentos de texto (O'HARA; DRAPER, 2011).

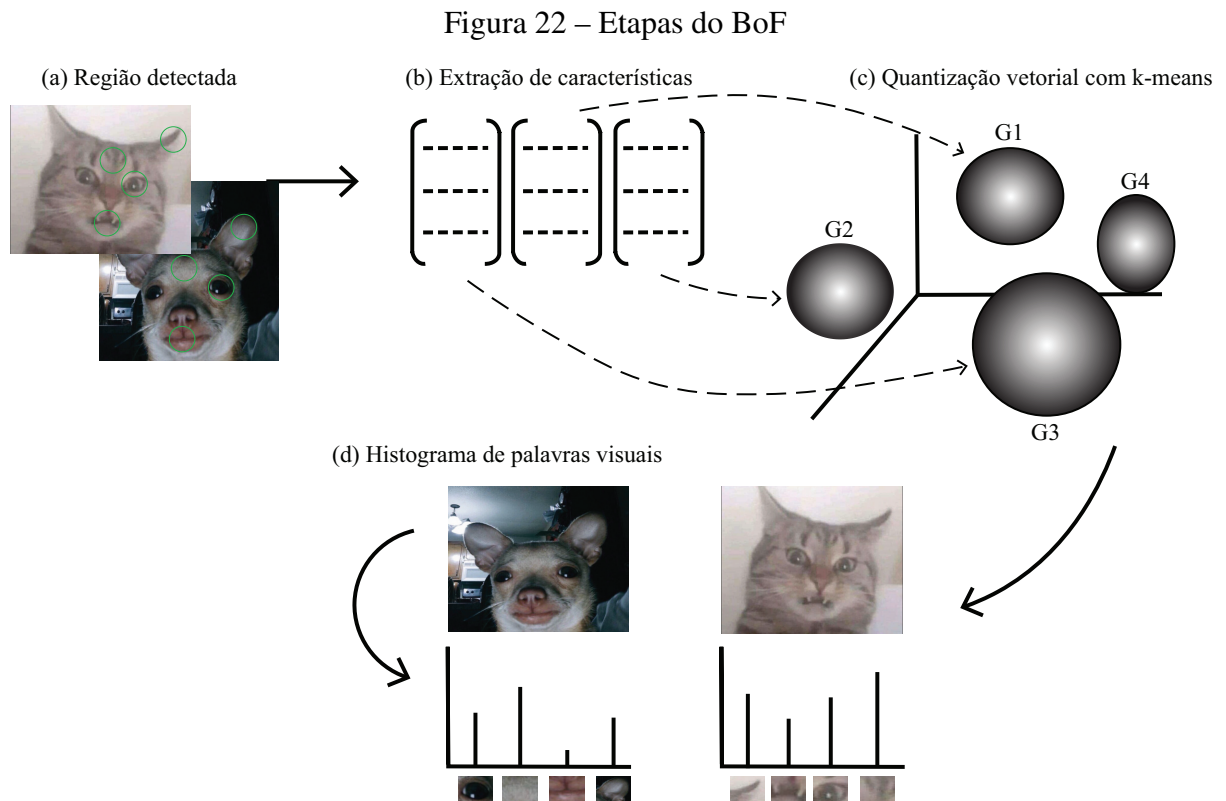
A partir dessas características, é construído um vocabulário visual por meio de técnicas de agrupamento, como o K-means, no qual cada grupo representa uma palavra visual. A frequência de ocorrência dessas palavras em uma imagem é então utilizada como vetor de entrada para o treinamento de classificadores, tal como SVM (Support Vector Machine), possibilitando a categorização automática de novas imagens. Esse processo é demonstrado na respectiva ordem da Figura 22.

Qualquer imagem pode ser utilizada como entrada no modelo Bag of Features (BoF) e convertida em uma representação baseada em histograma. Assim, na Figura 22(a) tem-se a etapa de detecção de regiões de interesse, a qual pode ser realizada utilizando uma grade fixa que percorre toda a imagem ou, alternativamente, por meio de detectores/descriptores de características, como o SURF — que é abordado na próxima Seção.

Em seguida, são extraídas as características das imagens na Figura 22(b), que servem como entrada para o algoritmo de agrupamento K-means (Figura 22(c)). Nesse processo, os dados são organizados em grupos (*clusters*) com alta homogeneidade interna e heterogeneidade entre grupos distintos.

A partir desse agrupamento é construído um histograma de palavras de palavras visuais (Figura 22(d)), que representa a frequência com que cada grupo (ou "palavra visual") aparece na imagem. Esse histograma é então utilizado como entrada para o classificador (Figura 22(e)), que realiza a tarefa de categorização da imagem com base nesse modelo representacional.

No presente Trabalho, foi utilizado o ambiente MATLAB, que fornece ferramentas dedicadas à implementação do BoF, integrando tanto a extração de características quanto a formação do vocabulário visual e o treinamento de classificadores.



Fonte: Imagem adaptada de Tsai (2012).

4.3.1 DETECTORES E DESCRITORES DE CARACTERÍSTICAS

A classificação de imagens baseada no BoF depende da capacidade de identificar e representar características relevantes dentro de uma imagem. Nesse contexto, dois conceitos fundamentais são utilizados: detecção de características e descrição de características, que apesar de relacionados, exercem funções distintas (O'HARA; DRAPER, 2011).

A detecção de características se refere ao processo de localizar pontos específicos em uma imagem que possuem informações visuais distintas e potencialmente úteis para diferenciação entre classes. Esses pontos, chamados de pontos-chave, são definidos como informações sobre a localização, a escala e, em alguns casos, a orientação no espaço da imagem (O'HARA; DRAPER, 2011). A detecção de características estabelece “onde” extrair informações relevantes, priorizando regiões com variações significativas de intensidade ou textura.

Já os descritores de características atuam na etapa posterior, uma vez identificado o ponto-chave, eles representam matematicamente a região ao seu redor. Um descritor transforma o padrão local de intensidades em um vetor numérico compacto, que preserva informações importantes para tarefas de comparação e classificação (O'HARA; DRAPER, 2011). Assim, enquanto a detecção define “onde” olhar, a descrição define “como” representar aquilo que foi encontrado.

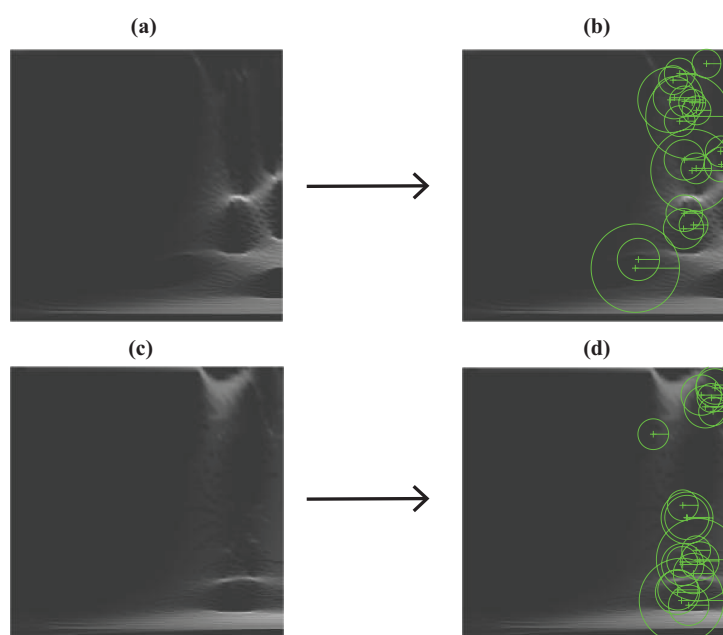
No presente Trabalho, para realizar as tarefas de detectar e descrever foi utilizado o método *Speeded-Up Robust Features* (SURF). Ele adota uma abordagem baseada na matriz

Hessiana para detecção de pontos de interesse. Posteriormente, uma das etapas mais importantes do SURF é a determinação de uma orientação para cada ponto de interesse detectado. Essa orientação é obtida ao calcular respostas da Wavelet de Haar nas direções horizontal e vertical dentro de uma região circular ao redor de cada ponto de interesse (BAY; TUYTELAARS; GOOL, 2006). Na Figura 23, é apresentada a representação gráfica das vinte características mais fortes detectadas em 2 imagens do conjunto utilizado para o treinamento realizado nesse Trabalho.

Em 23(a) e 23(c), são exibidos, respectivamente, os espectrogramas gerados pela transformada wavelet sincronizada para uma situação de *inrush* e de falta, ambos representados em escala de cinza, com o mesmo instante de chaveamento e tempo de análise. Embora a distribuição da energia no espectro de frequências não seja detalhada neste momento, já é possível observar diferenças visuais significativas entre as formas espectrais das duas imagens. Já em 23(b) e 23(d), observa-se a aplicação do algoritmo SURF às imagens correspondentes, destacando as vinte características mais relevantes extraídas de cada espectrograma.

As respostas são ponderadas por uma função Gaussiana e utilizadas para encontrar a direção predominante dos gradientes locais, o que torna o algoritmo invariante a rotações. Com a orientação definida, o próximo passo é a extração do descritor de características. A região ao redor do ponto de interesse é agora subdividida em uma grade de sub-regiões menores (BAY; TUYTELAARS; GOOL, 2006). Neste Trabalho, essa grade foi definida como 10x10 pixels, escolhido como o menor valor encontrado que evitou estouro de memória durante a execução. Mais detalhes sobre o SURF podem ser encontrados em (BAY; TUYTELAARS; GOOL, 2006).

Figura 23 – As vinte características mais fortes extraídas pelo SURF. (a) Espectrograma gerado pela TWS para o *inrush*. (b) SURF aplicado ao espectrograma gerado para o *inrush*. (c) Espectrograma gerado pela TWS para a falta. (d) SURF aplicado ao espectrograma gerado para a falta.

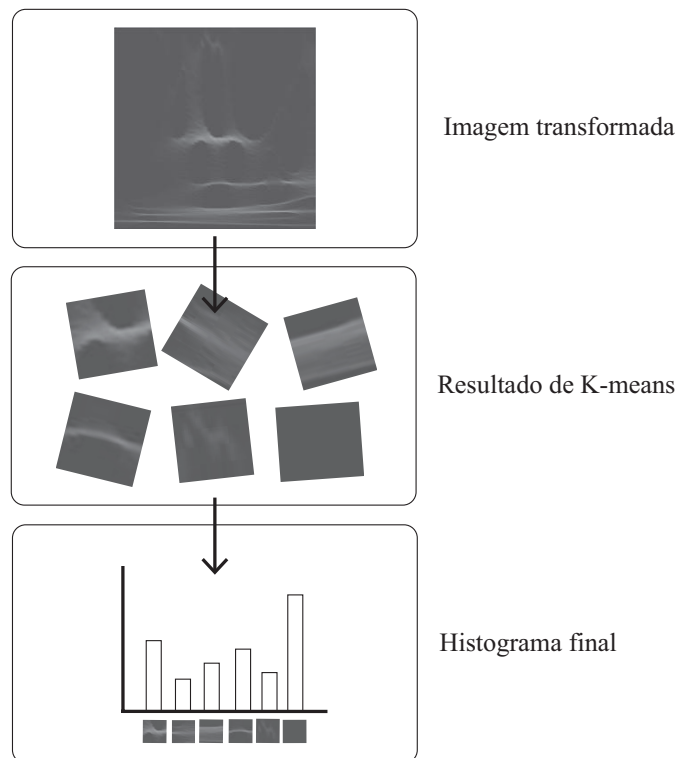


4.3.2 FREQUÊNCIA DE OCORRÊNCIA DAS PALAVRAS EM UMA IMAGEM

Após a detecção dos pontos de interesse e a extração dos descritores de características utilizando o algoritmo SURF, é necessário transformar a grande quantidade de vetores extraídos em uma representação mais compacta. Para isso, é aplicada uma técnica de quantização vetorial do espaço de características. Essa quantização é realizada, em geral, por meio do algoritmo de agrupamento K-means, que organiza os vetores de características em k grupos ou *clusters* distintos. Cada *cluster* representa uma palavra visual, e o conjunto de todos os *clusters* forma o chamado vocabulário visual (NISTER; STEWENIUS, 2006). O K-means atua aproximando características semelhantes entre si, reduzindo o número total de vetores e facilitando a representação posterior das imagens.

A partir disso, é possível formar o histograma de palavras visuais correspondente a cada imagem. Esse histograma é composto pela contagem de quantas vezes cada palavra visual aparece na imagem. Cada entrada do histograma corresponde a uma palavra visual do vocabulário previamente construído e o valor dessa entrada reflete a frequência com que essa palavra foi detectada na imagem. Como resultado, uma imagem é transformada em um vetor fixo, independentemente do número original de características extraídas. A Figura 24 ilustra um exemplo do histograma de palavras.

Figura 24 – Histograma de Palavras



Fonte: Autor.

Dessa forma, imagens que compartilham padrões visuais semelhantes tendem a ter histogramas com distribuições próximas, enquanto imagens pertencentes a categorias distintas

apresentarão histogramas diferenciados.

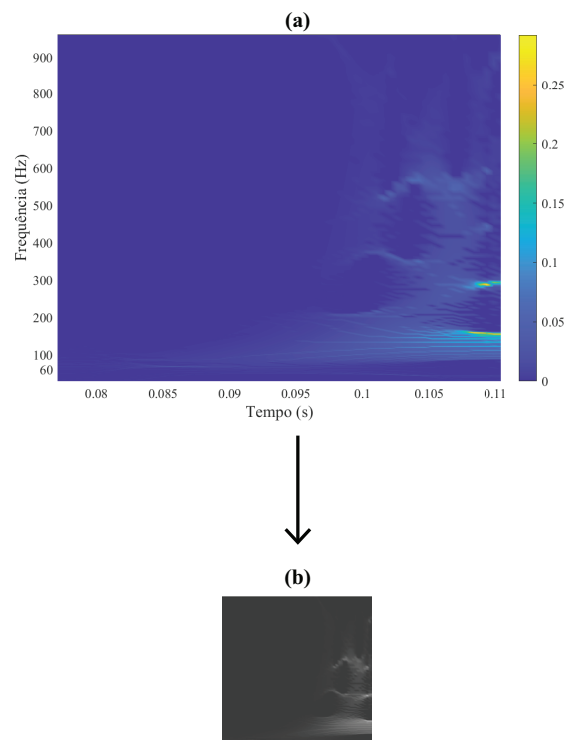
Essa representação vetorial baseada em histogramas serve como entrada para o treinamento de classificadores, como o Support Vector Machine (SVM), que é utilizado para aprender a separação entre diferentes classes de imagens.

4.4 DESCRIÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO

Esta Seção descreve a metodologia adotada para a correta diferenciação entre eventos de *inrush* e de curto-circuito em transformadores de potência. O método proposto combina a análise tempo-frequência da Transformada Wavelet Sincronizada com o algoritmo *Bag of Features* aplicado à classificação de imagens. Inicialmente, os sinais de corrente diferencial obtidos são processados pela TWS, resultando em representações tempo-frequência. Essas representações são convertidas em espectrogramas visuais, que capturam a distribuição espectral do sinal ao longo do tempo.

Por padrão, o ambiente MATLAB gera esses espectrogramas utilizando um mapa de cores na escala azul, conforme o ilustrado na Figura 25 (a). Entretanto, para otimizar o processamento pelo algoritmo do BoF e reduzir o risco de estouro de memória, as imagens foram convertidas para escala de cinza e tiveram sua resolução diminuída para 227 x 227 pixels, como mostrado na Figura 25 (b).

Figura 25 – Espectrogramas gerados pela TWS. (a) Configuração padrão do MATLAB. (b) Resolução e qualidade transformadas.

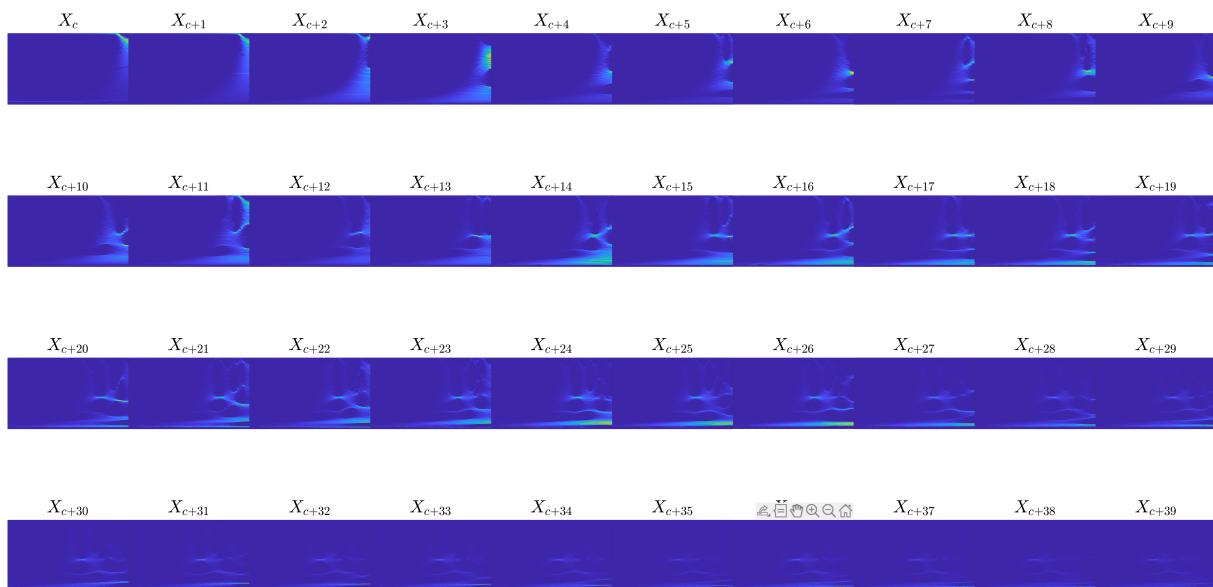


Adicionalmente, cada espectrograma é construído a partir de uma janela de análise correspondente a dois ciclos do sinal. A escolha pela janela de dois ciclos é justificada pela necessidade de equilibrar a resolução tempo-frequência e minimizar os erros na formação do espectrograma, visto que janelas muito pequenas provocam distorções significativas na representação. A amostragem é realizada ponto a ponto, de forma deslizante: isto é, considerando o intervalo de X_1 até X_n , para o primeiro espectrograma, X_2 a X_{n+1} para o segundo, e assim sucessivamente.

A ideia principal é baseada na análise das diferenças visuais entre os espectrogramas gerados para eventos de corrente de *inrush* e para situações de curto-circuito. Essa distinção pode ser observada comparando a Figura 26 (evento de *inrush*) com a Figura 27 (evento de falta), considerando a sequência de espectrogramas gerados a partir do instante de chaveamento X_c .

Em eventos de *inrush*, devido ao rico conteúdo harmônico característico desse fenômeno, é possível perceber a presença de componentes espectrais distribuídas ao longo de praticamente toda a faixa de frequências analisada, que se estende 0 até 1000 Hz. Além disso, essas componentes tendem a se manter persistentes ao longo das janelas subsequentes, formando padrões de energia contínua no espectrograma.

Figura 26 – Espectrogramas para situação de *inrush*.



Fonte: Autor.

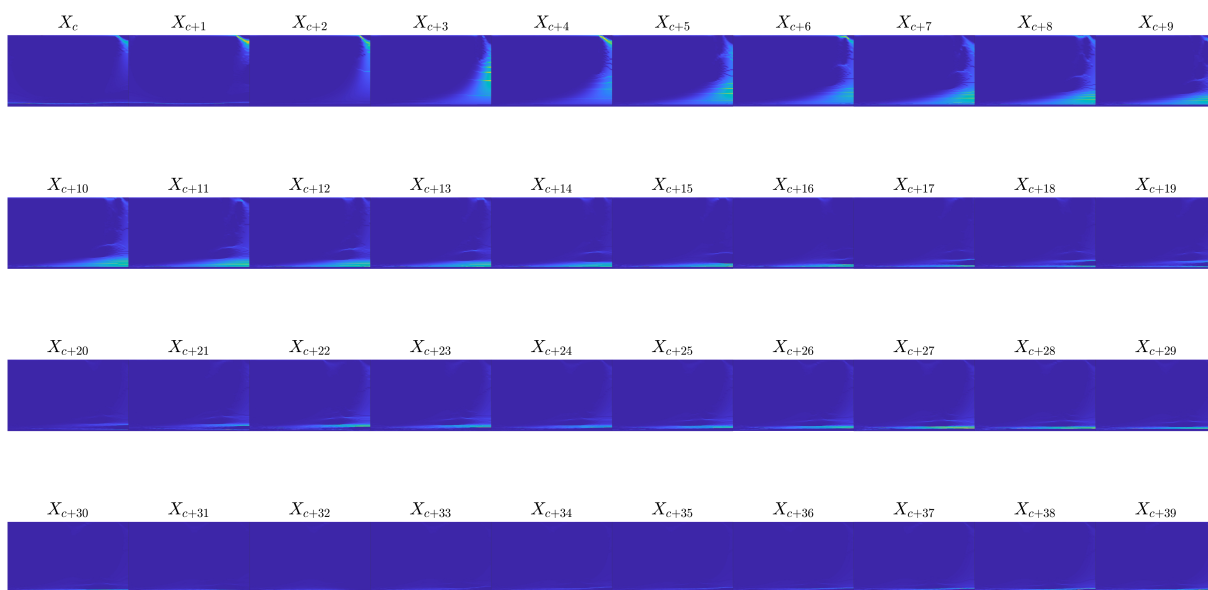
Por outro lado, nos eventos de falta, o espectro inicialmente apresenta uma distribuição mais espalhada, porém, com menor intensidade e rapidamente as componentes de alta frequência tendem a desaparecer, concentrando a energia em faixas de frequência mais baixas, conforme o tempo evolui. Essa diferença no comportamento espectral, tanto em termos de dispersão quanto de persistência ao longo das janelas, é explorada para a correta identificação dos eventos.

As imagens que se repetem no início da sequência correspondem aos primeiros instantes

após o chaveamento, durante os quais a janela de análise ainda está sendo preenchida com amostras. Nesse intervalo, a sobreposição entre amostragens consecutivas é significativa, o que resulta em espectrogramas visualmente semelhantes até que o evento propriamente dito tenha início.

Por essa razão, o período de X_c até X_{c+10} foi classificado como “outros eventos” na etapa de treinamento, com o objetivo de evitar falsos disparos. Isso se justifica pelo fato de que, nesse intervalo, especialmente entre X_c e X_{c+5} , o evento ainda não ocorreu e os efeitos do chaveamento estão sendo gradualmente distribuídos ao longo da faixa de frequências, o que gera padrões espectrais repetitivos e pouco representativos da condição real do fenômeno.

Figura 27 – Espectrogramas para situação de falta.



Fonte: Autor.

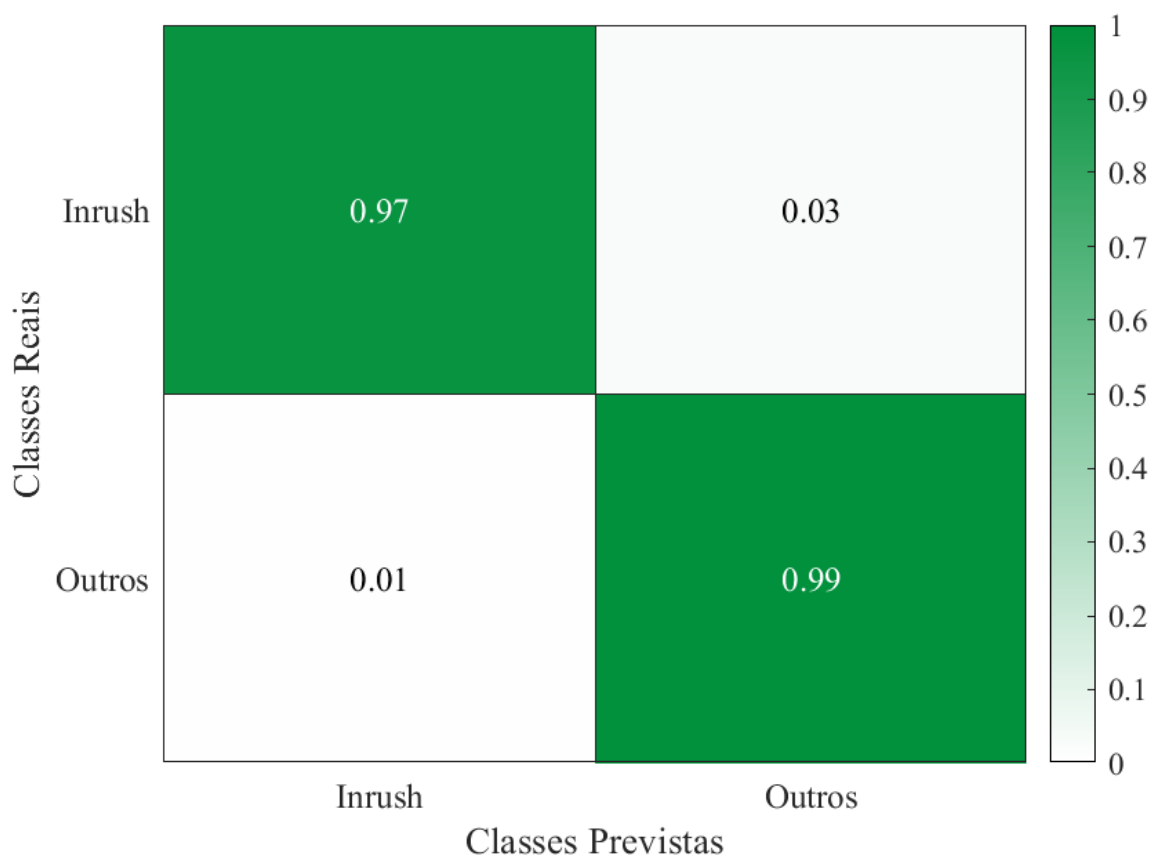
Após a geração e o pré-processamento dos espectrogramas, o próximo passo consiste na utilização do algoritmo do BoF para realizar a extração de características visuais e a classificação dos eventos.

Foram utilizadas aproximadamente 42.000 imagens como entrada, sendo cerca de 21.000 imagens correspondentes a eventos de *inrush* e 21.000 imagens relacionadas a outros eventos, como faltas. As imagens foram previamente separadas nessas duas categorias distintas para a organização do processo de treinamento e validação. Durante a etapa de extração de características, o método SURF foi aplicado sobre as imagens, mantendo 80% das características mais fortes detectadas em cada imagem. A partir das características extraídas, o algoritmo BoF construí um vocabulário visual, agrupando descritores semelhantes por meio do algoritmo de agrupamento K-means. Cada imagem então foi representada por um histograma de palavras visuais, que serviu de vetor de entrada para o treinamento de um classificador SVM. Do total de imagens processadas, 60% foram destinadas ao treinamento do modelo, enquanto os 40%

restantes foram utilizados para validação da classificação. Cabe ressaltar que essas imagens foram obtidas a partir do sistema de teste apresentado posteriormente no Capítulo 5, considerando diferentes instantes de chaveamento e condições operacionais distintas daquelas utilizadas no sistema empregado para a comparação dos métodos no Capítulo seguinte.

O desempenho do classificador na etapa de validação foi avaliado por meio da matriz de confusão, apresentada na Figura 28, a qual resume a quantidade de acertos e erros na identificação dos eventos de *inrush* e dos outros eventos.

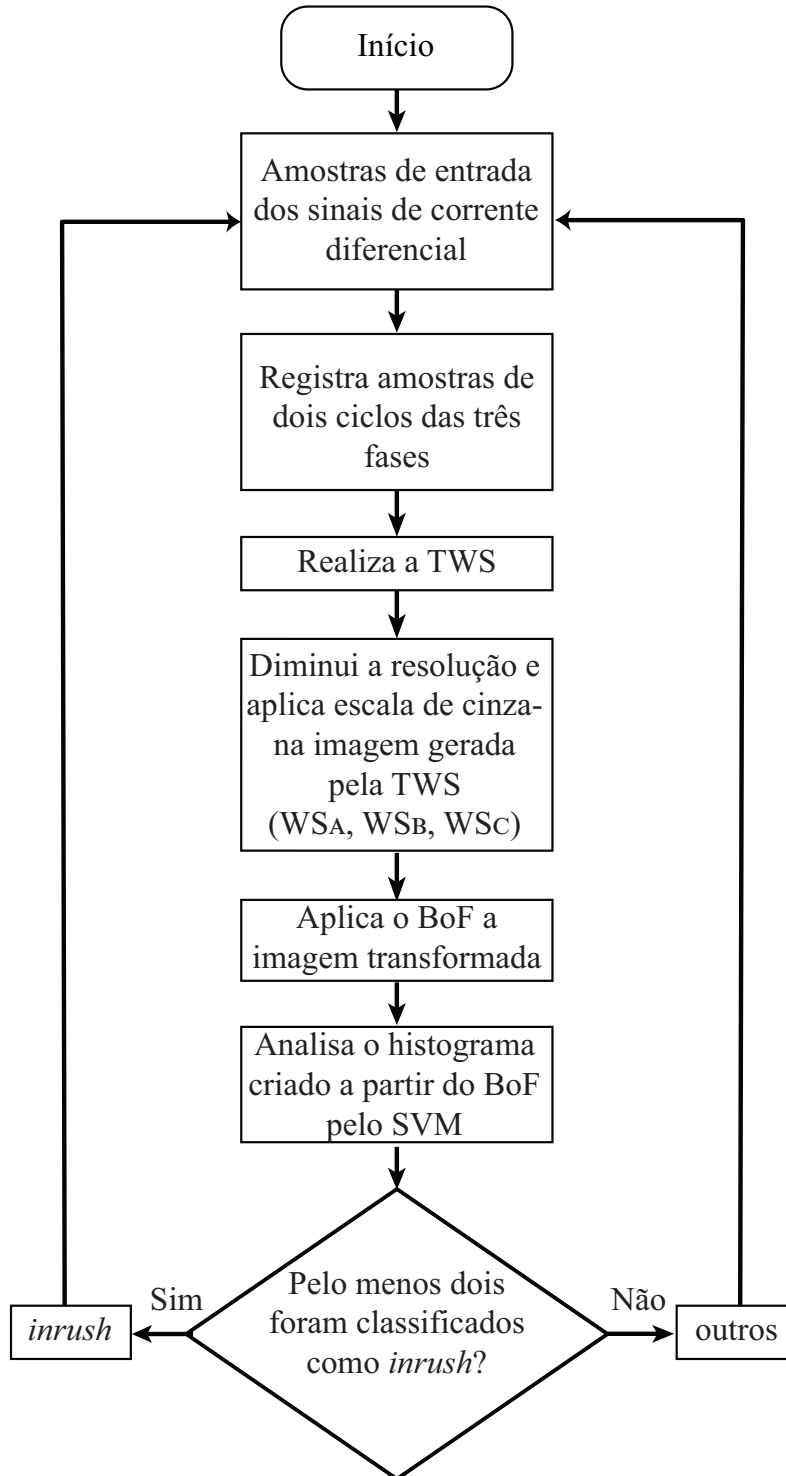
Figura 28 – Matriz de Confusão



Fonte: Autor.

Por fim, o processo de identificação caracteriza um evento como *inrush* quando ao menos duas das três fases são classificadas como energização do transformador. As etapas do método descritas neste Capítulo são ilustradas no fluxograma da Figura 29, onde WS_A , WS_B e WS_C representam as imagens transformadas em escala de cinza e com resolução diminuída, para os sinais de corrente diferencial das fases A, B e C, respectivamente.

Figura 29 – Fluxograma do DIPI.



4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste Capítulo foi apresentado o método proposto para a identificação de correntes de *inrush* em transformadores de potência, o qual combina a Transformada Wavelet Sincronizada (TWS) com o algoritmo de classificação *Bag of Features* (BoF). Inicialmente, foram discutidos os fundamentos teóricos da TWS, destacando sua capacidade de fornecer uma representação tempo-frequência precisa, por meio da realocação espectral dos coeficientes da Transformada Wavelet Contínua. Em seguida, a metodologia BoF foi abordada, com ênfase nos processos de extração de características, quantização vetorial e formação do vocabulário visual, que tornam possível a classificação automática de espectrogramas derivados dos sinais de corrente diferencial. A junção dessas duas abordagens viabiliza a transformação de sinais temporais em imagens discriminativas, capazes de representar de forma eficaz os padrões espectrais associados aos eventos de *inrush* e de falta. A classificação é realizada com o auxílio do classificador SVM, treinado com um conjunto representativo de espectrogramas obtidos em simulações diversas.

5 RESULTADOS

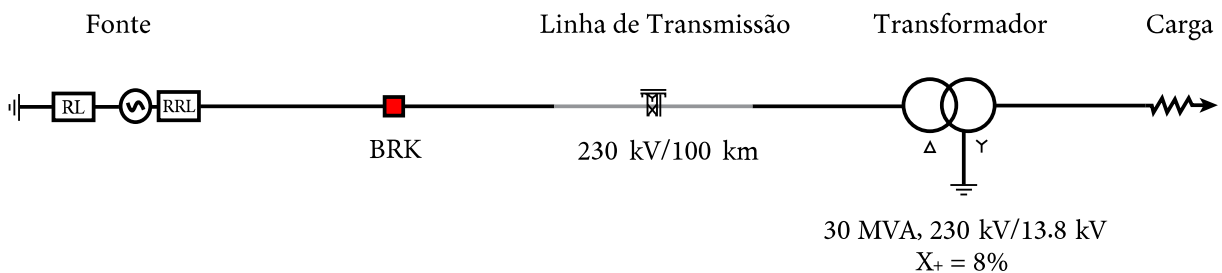
5.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Este Capítulo aborda a aplicação das técnicas discutidas anteriormente aos dados de corrente obtidos por meio da simulação do sistema teste no PSCAD, com ênfase na análise dos sinais de corrente diferencial em situações de *inrush* e curto-circuito. O uso do recurso de múltiplas execuções (*multiple-run*) do PSCAD possibilitou a manipulação de variáveis de entrada, tais como o instante de chaveamento do transformador, o momento em que ocorre a falta e a geração de faltas deslizantes. A análise destes sinais foi realizada no MATLAB. Por fim, os resultados obtidos mostram a eficácia dos algoritmos aplicados, não apenas nas situações previamente mencionadas, mas também destacando o desempenho ao lidar com sinais sob diversas taxas de amostragem.

5.2 SISTEMA TESTE

A Figura 30 demonstra o sistema teste implementado no software PSCAD, projetado para a aquisição de sinais de correntes diferenciais em contextos de energização de transformadores sem e com carga. O arranjo consiste em uma fonte fornecendo energia para uma linha de transmissão de 230 kV e 100 km de comprimento, que está conectada a um transformador de 30 MVA, com uma tensão de 230 kV no primário e 13,8 kV em seu secundário, o transformador possui uma reatância de sequência positiva (X_+) de 8%. No sistema, o elemento BRK é empregado para simular a atuação dos disjuntores.

Figura 30 – Sistema teste para *inrush*.

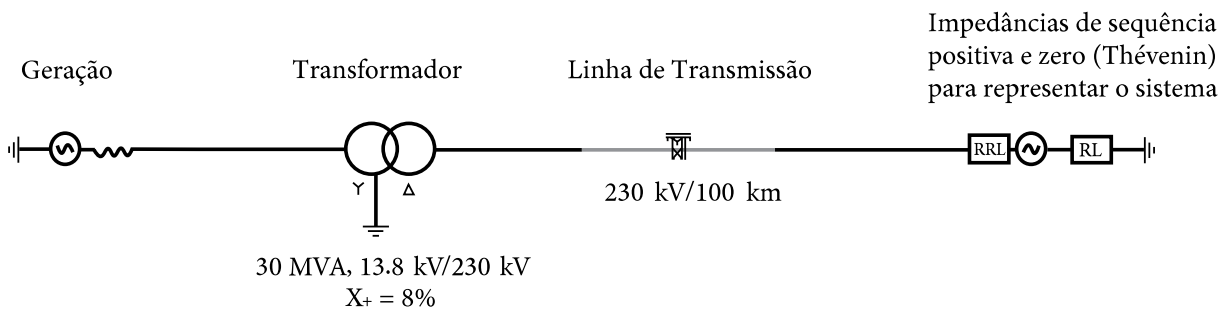


Fonte: Autor.

A modelagem da linha de transmissão no PSCAD segue o modelo de fase dependente da frequência, incorporando a complexidade do comportamento da linha nas diversas frequências de operação. A configuração geométrica da linha de transmissão adotada inclui três condutores, cada um com um cabo do tipo *chukar* sólido por fase, com 30 metros de altura do solo até o cabo mais baixo e 5 metros de espaçamento entre o cabo central e os cabos laterais. Dois cabos para-raios são posicionados a 40 metros do solo, mantendo entre si uma distância de 10 metros. Os demais parâmetros da linha de transmissão são os padrões fornecidos pelo PSCAD. A resistividade do solo considerada para as simulações é de 1000Ω .

Para análise de faltas, o sistema ilustrado na Figura 31 foi utilizado para replicar tais condições na linha de transmissão. O sistema em questão mantém a consistência com a configuração previamente mencionada, contudo, agora apresenta o transformador com uma tensão de 13,8 kV no lado primário e 230 kV no secundário. A linha manteve os mesmos parâmetros e configurações. Neste cenário, foram aplicadas faltas monofásicas, bifásicas-terra e trifásicas em diversos pontos ao longo da linha de transmissão, especificamente em 0%, 25%, 50%, 75% e 100% do seu comprimento.

Figura 31 – Sistema teste para faltas.



Fonte: Autor.

Utilizando o componente de *multiple-run* do PSCAD, o instante de chaveamento da energização e de ocorrência de faltas foi variado de 0,1 a 0,11667 s, com incrementos de 0,00208375 s por execução. Adicionalmente, as simulações consideraram diferentes valores de tensão no ponto de joelho da curva de saturação do transformador, permitindo entender como a saturação do transformador influencia na forma de onda resultante. As Tabelas 1 e 2 mostram parâmetros do transformador e da fonte, respectivamente.

Tabela 1 – Parâmetros do transformador trifásico de dois enrolamentos.

Parâmetro	Valor
Reatância de entreferro	0,2 (pu)
Constante de tempo de decaimento de <i>inrush</i>	0,5 (s)
Corrente de magnetização	1,0 (%)
Perdas sem carga	0,005 (pu)

Fonte: Autor.

Tabela 2 – Parâmetros da fonte de tensão trifásica.

Parâmetro	Valor
Impedância de sequência positiva	5,0 (Ω)
Ângulo da impedância de sequência positiva	82,0 ($^\circ$)
Impedância de sequência zero	6,0 (Ω)
Ângulo da impedância de sequência zero	80,0 ($^\circ$)

Fonte: Autor.

5.3 CASO 1: ENERGIZAÇÃO DO TRANSFORMADOR SEM CARGA

Esse caso aborda as condições de *inrush* na energização do transformador sem carga, focando em diferentes instantes de chaveamento e ajustes na tensão de magnetização. Com um intervalo de simulação que varia de 0,1 a 0,1167 s, totalizando 5 etapas de tempo. Ademais, também é ajustada a tensão no ponto de joelho da curva de magnetização, com valores que vão de 1 a 1,5 pu, explorando pontos específicos como 1,02, 1,05, 1,1, 1,15 e 1,2 pu. Os resultados dessas simulações são ilustrados nas Figuras 32 a 35, onde são observados como as metodologias implementadas se comportam.

A Figura 32 ilustra a simulação do caso 1 para o DIPI, com chaveamento em 0,1 segundo e tensão no joelho da curva igual a 1 pu. Em 32(a), mostra-se o sinal de corrente diferencial para a fase A, onde é possível observar a resposta do sistema ao chaveamento em 0,1 segundo, indicado pela linha pontilhada vermelha. A corrente diferencial, I_{dA} , exibe oscilações características da forma de onda da corrente de magnetização, como os picos elevados e a característica de saturação da onda.

Na Figura 32(b), são apresentadas as imagens geradas pela TWC, utilizadas como entrada para a análise do algoritmo Bag of Features. As siglas WS_A , WS_B e WS_C representam, respectivamente, os espectrogramas das fases A, B e C. Acima das imagens, encontra-se a representação do intervalo de amostras de X_c até X_{c+20} , correspondendo ao espectrograma gerado a partir do instante de chaveamento (X_n) até 20 amostras subsequentes. Portanto, essas imagens não retratam todo o intervalo temporal observado na Figura 32(a), sendo o objetivo aqui tornar o processo mais compreensível visualmente, para fins de apresentação e também por ser o instante de chaveamento o ponto mais crítico de detecção.

Observa-se que as imagens entre X_c e X_{c+10} tendem a se repetir em diversos casos, não apresentando, de fato, a manifestação do evento de *inrush*. Isso ocorre devido ao curto intervalo de tempo entre o chaveamento e o início efetivo do fenômeno. Por essa razão, conforme discutido no Capítulo 4, tais janelas não foram utilizadas na etapa de treinamento para detecção do *inrush*, sendo classificadas como “outros eventos”. Essa decisão visou reduzir disparos falsos causados pelo instante de chaveamento, um comportamento identificado com frequência nos eventos analisados por outros métodos ao longo deste Trabalho.

A partir de X_{c+10} , o evento de *inrush* torna-se mais evidente, com o espectrograma exibindo uma faixa de frequências mais distribuída e a presença de padrões repetitivos concentrados, principalmente, nas bandas centrais.

Outro ponto importante a se observar é que *inrush* repercute simultaneamente nas três fases. Assim, as imagens geradas apresentam distorções nas faixas de frequência de todas as fases, o que facilita sua identificação, especialmente quando comparado a eventos de falta, que, por vezes, afetam uma ou duas fases.

Adicionalmente, outra característica presente no espectrograma é o não desaparecimento dessas componentes instantes após o chaveamento, diferentemente do que se observa em situações de falta, como será discutido ao longo deste Capítulo.

Vale ressaltar que o algoritmo utilizado não se baseia nos valores das faixas de frequência em si. Em vez disso, a análise é feita com base apenas na imagem espectral e na forma como ela é representada visualmente.

Além disso, na Figura 32(c), observa-se a detecção do *inrush*, com um pequeno intervalo entre o instante de chaveamento e o momento de detecção propriamente dito. Isso se deve ao fato de o treinamento não ter sido realizado com as imagens de X_c até X_{c+10} como comentado. O método atuou conforme o esperado, identificando corretamente o evento.

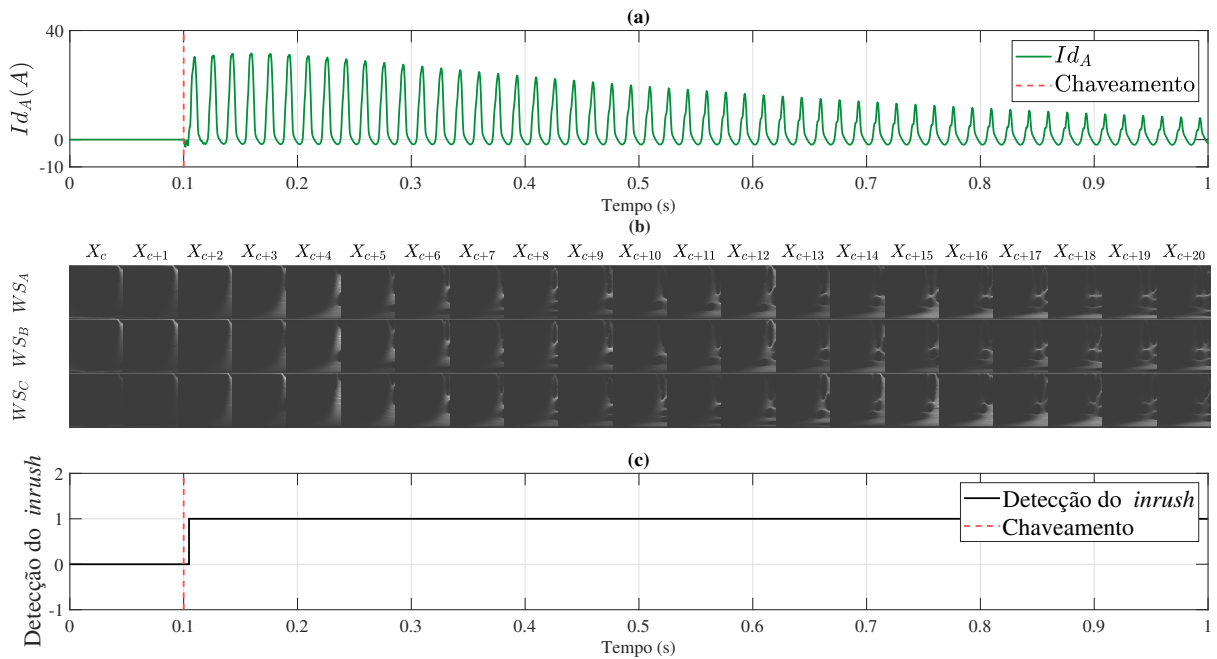
Logo em seguida, a Figura 33 ilustra a simulação do caso 1 para o MDC, o qual em (a) é mostrado o sinal de corrente i , em (b) são detalhadas as dimensões da caixa, para as fases A, B e C, representadas pelas linhas D_A , D_B e D_C , respectivamente. Estas linhas traçam os valores das dimensões da caixa ao longo do tempo. O critério para a detecção foi estabelecido como 1,03, indicado pela linha pontilhada horizontal em magenta. É possível observar que, para as fases A e B, as dimensões da caixa permanecem abaixo do critério estabelecido e, em (c), a detecção do *inrush* é apresentada, sendo que o valor igual a 1 indica a detecção. É importante notar que o valor mais alto observado em D_B pode ser atribuído ao próprio instante de chaveamento, juntamente com uma pequena distorção causada por ele. Tal operação pode ser responsável por transitórios temporários que afetam as medições das dimensões da caixa. O gráfico confirma que a detecção foi bem sucedida ao longo do tempo, mesmo que logo após 0,9 s a detecção não tenha acontecido, mas é possível observar que a forma de onda de I_{dA} já começa a decair consideravelmente.

Já a Figura 34 exibe o resultado da simulação do caso 1 para o MTEO, sendo o instante de chaveamento em 0,1 e com a tensão no joelho da curva equivalente a 1 pu. Na Figura 34(a), é apresentado o sinal de corrente I_{dA} , onde novamente se observam as características da forma de onda do *inrush*. Na parte (b), o operador ψ do TEO para a fase A (ψ_{dA}) é demonstrado, exibindo picos pronunciados, os quais podem ser atribuídos à energia concentrada no sinal devido à presença de componentes de alta frequência associados ao *inrush*.

A Figura segue com 34(c), na qual é representado o índice FI_A , calculado com base nas variações da saída do TEO. Esse índice tem como objetivo quantificar a presença de flutuações de alta frequência no sinal. Observa-se que FI_A ultrapassa o critério pré-estabelecido de 0,2 (linha pontilhada azul), indicando uma detecção correta do evento de *inrush*. Em 34(d), tem-se a ilustração da detecção, evidenciando a devida operação do método.

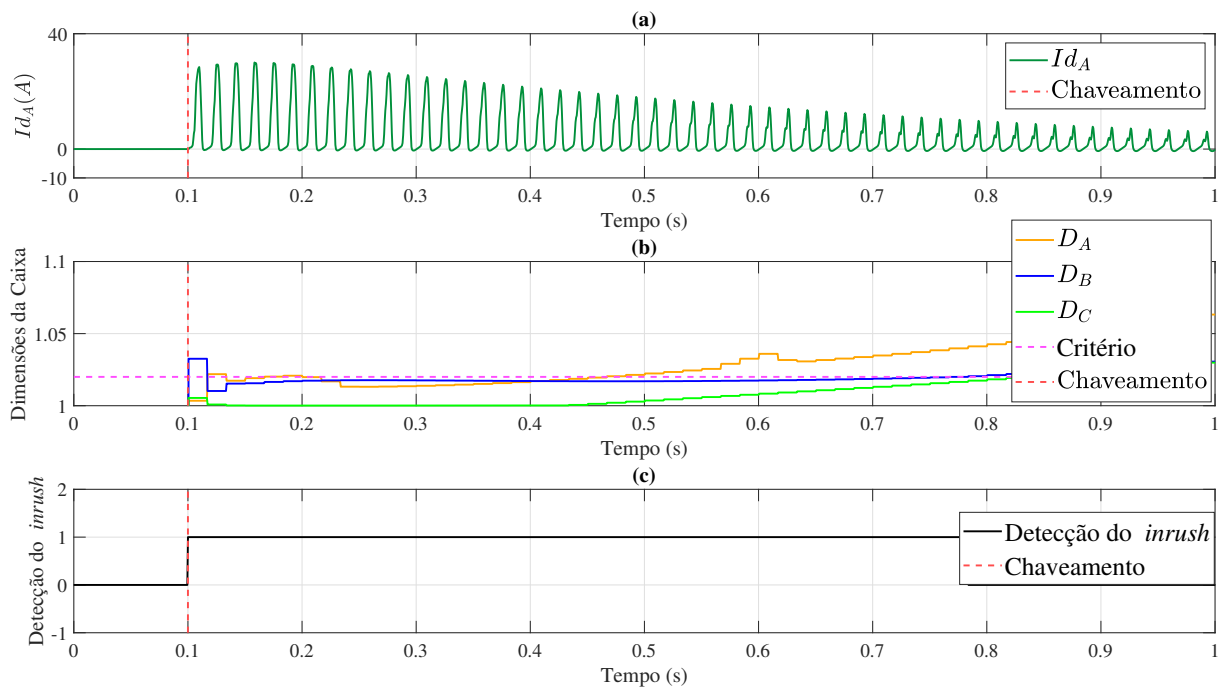
Por fim, a Figura 35 apresenta a simulação correspondente ao método MCW. Os critérios 1 e 2, mostrados em 35(b), com valores de 0,000001 e 2, respectivamente. Sendo o critério 1 não visível no gráfico devido à alta amplitude da resposta gerada pelo MCW. No entanto, como ambos os critérios foram excedidos, conclui-se que a detecção ocorreu de forma correta.

Figura 32 – Simulação do caso 1 para o DIPI. (a) Sinal de corrente diferencial fase A. (b) Espectrogramas gerados pela TWS. (c) Detecção do *inrush*.



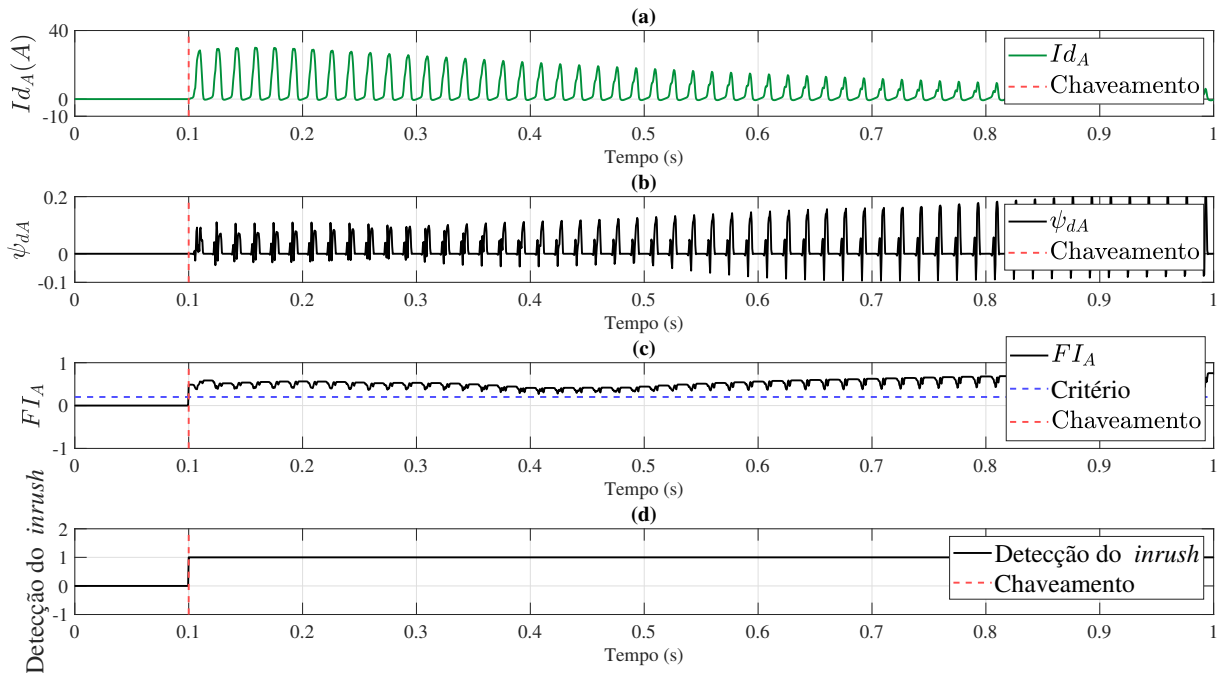
Fonte: Autor.

Figura 33 – Simulação do caso 1 para o MDC. (a) Sinal de corrente diferencial fase A. (b) Dimensões da caixa. (c) Detecção do *inrush*.



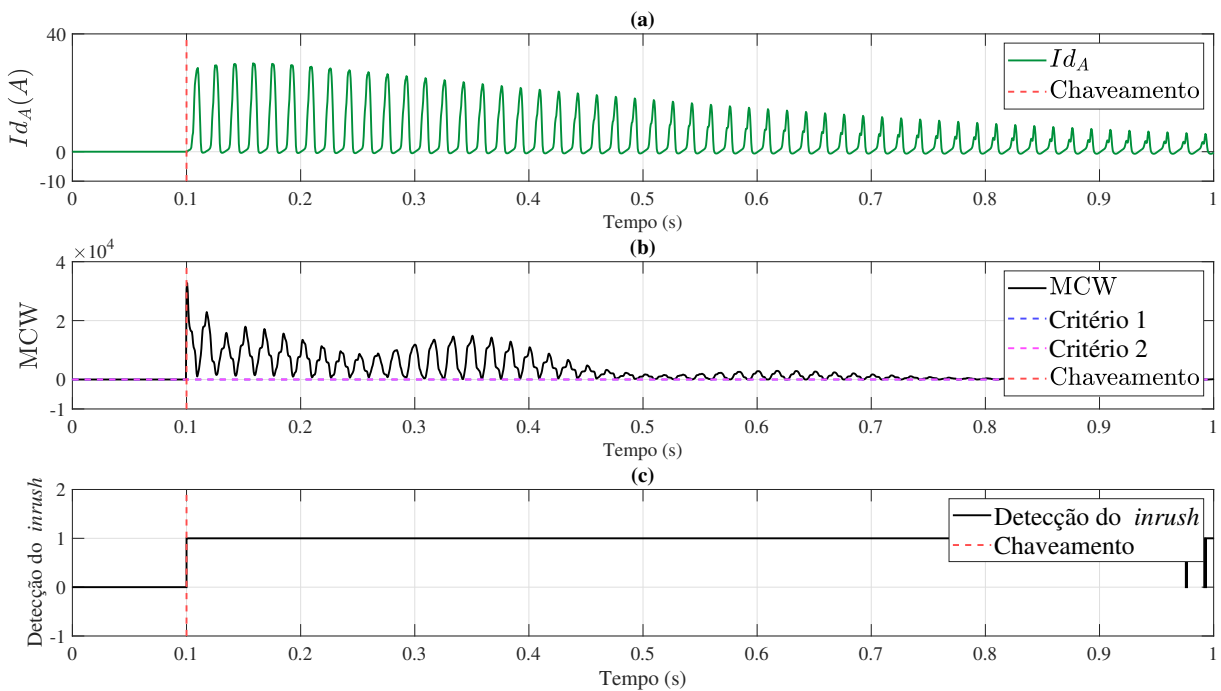
Fonte: Autor.

Figura 34 – Simulação do caso 1 para o MTEO. (a) Sinal de corrente diferencial fase A. (b) ψ_{dA} . (c) FI_A . (d) Detecção do *inrush*.



Fonte: Autor.

Figura 35 – Simulação do caso 1 para o MCW. (a) Sinal de corrente diferencial fase A. (b) MCW. (c) Detecção do *inrush*.



Fonte: Autor.

5.4 CASO 2: ENERGIZAÇÃO DO TRANSFORMADOR COM CARGA

Na sequência de estudo de caso, agora a seção trata sobre as condições de *inrush* na energização do transformador sob carga. Este caso aborda o mesmo tempo de chaveamento, de 0,1 a 0,11667 s, com os mesmos incrementos. Além disso, ajustes na tensão no ponto de joelho da curva de magnetização também foram aplicados, mantendo a mesma faixa de 1 a 1,5 pu, mas agora com ênfase no comportamento imposto pela presença da carga.

A Figura 36 apresenta os resultados do Caso 2 aplicados ao método DIPI, considerando o chaveamento de um transformador energizado com carga, com tensão no joelho da curva de magnetização igual 1 pu e instante de chaveamento em 0,1 s. Em 36(a), é exibido o sinal de corrente diferencial I_{dA} . Observa-se um aumento abrupto da corrente logo após o chaveamento. No entanto, sua amplitude é menor, se comparada ao observado no caso anterior, e o valor nominal é atingido mais rapidamente devido às características impostas pela carga.

Na Figura 36(b), são mostradas as imagens dos espectrogramas no intervalo de X_c a X_{c+20} , conforme apresentado no Caso 1. É possível notar novamente uma acentuada presença de componentes em quase toda a faixa de frequências para as três fases, além da silhueta característica esperada em eventos de *inrush*. Há baixa dissipação das componentes após X_{c+10} e a concentração de energia nas bandas centrais, aspectos que reforçam a identificação do fenômeno por meio das imagens.

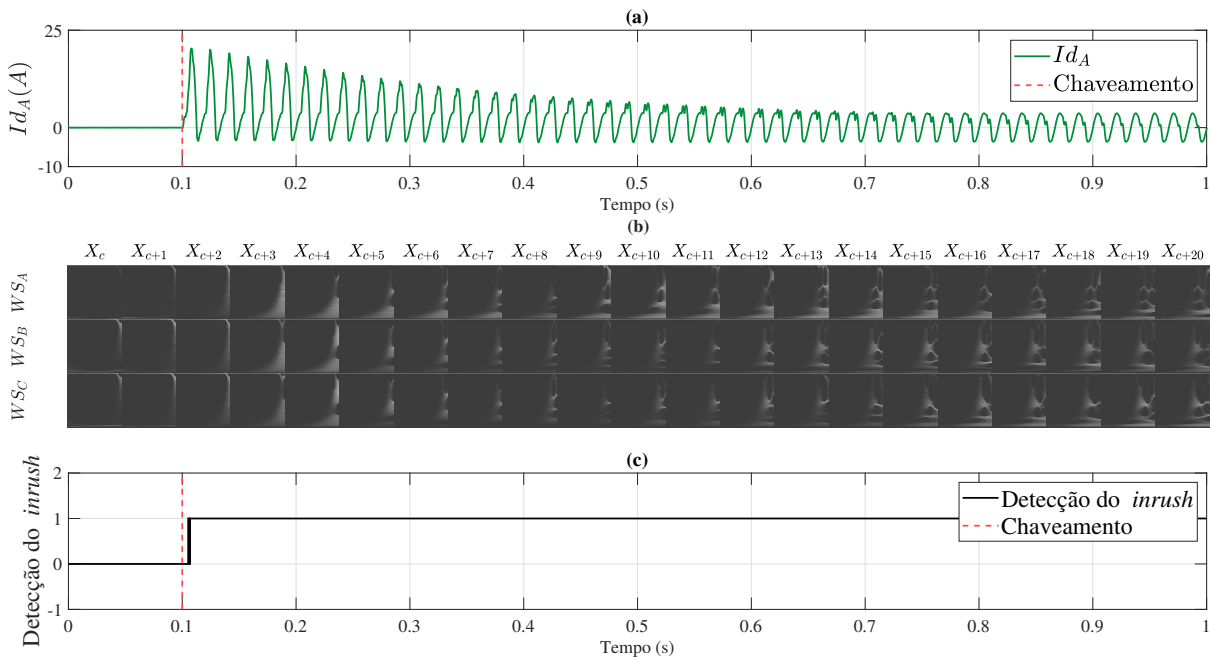
Já 36(c) exhibe o resultado da detecção, que ocorreu conforme o esperado. O método manteve um pequeno intervalo entre o chaveamento e a identificação do evento, evitando disparos incorretos no instante inicial.

Por outro lado, a Figura 37 apresenta os resultados obtidos com o método MDC. No gráfico (b), são mostradas as dimensões das caixas para as três fases. A análise conjunta de (b) e (c) indica que a detecção não foi correta. Além de gerar um falso disparo no instante de chaveamento, o método apresentou atraso, iniciando a detecção apenas por volta de 0,13 s. Ademais, o intervalo de detecção foi demasiadamente curto, o que poderia comprometer o desempenho em uma aplicação prática. Esses fatores caracterizam uma operação deficiente do algoritmo.

Agora, observando a Figura 38, é exibido o resultado do MTEO para esse caso e demonstra que este método pode ser mais sensível na detecção de energização sem carga. No gráfico (c), o FI_A para a fase A é mostrado, o qual é possível notar que o critério é ultrapassado enquanto a forma de onda apresenta características transitórias.

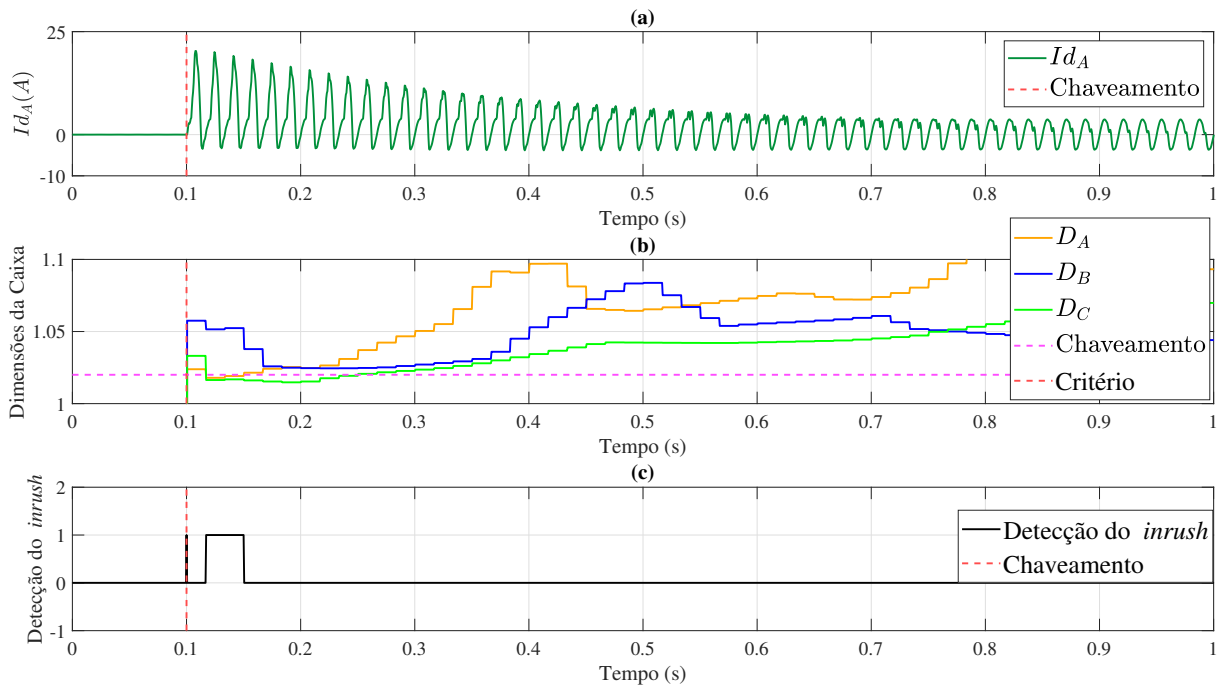
A 39 apresenta o resultado para o MCW. Novamente, há uma amplitude na saída do método, o que indica uma correta operação do algoritmo.

Figura 36 – Simulação do caso 2 para o DIPI. (a) Sinal de corrente diferencial fase A. (b) Espectrogramas gerados pela TWS. (c) Detecção do *inrush*.



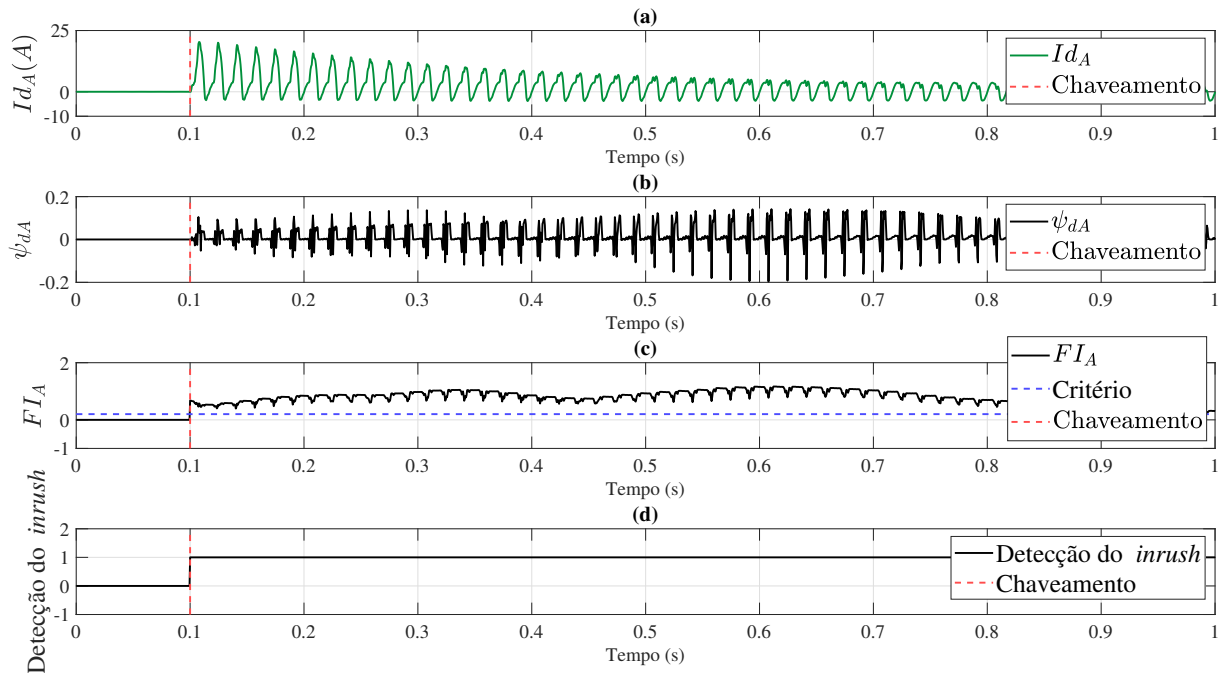
Fonte: Autor.

Figura 37 – Simulação do caso 2 para o MDC. (a) Sinal de corrente diferencial fase A. (b) Dimensões da caixa. (c) Detecção do *inrush*.



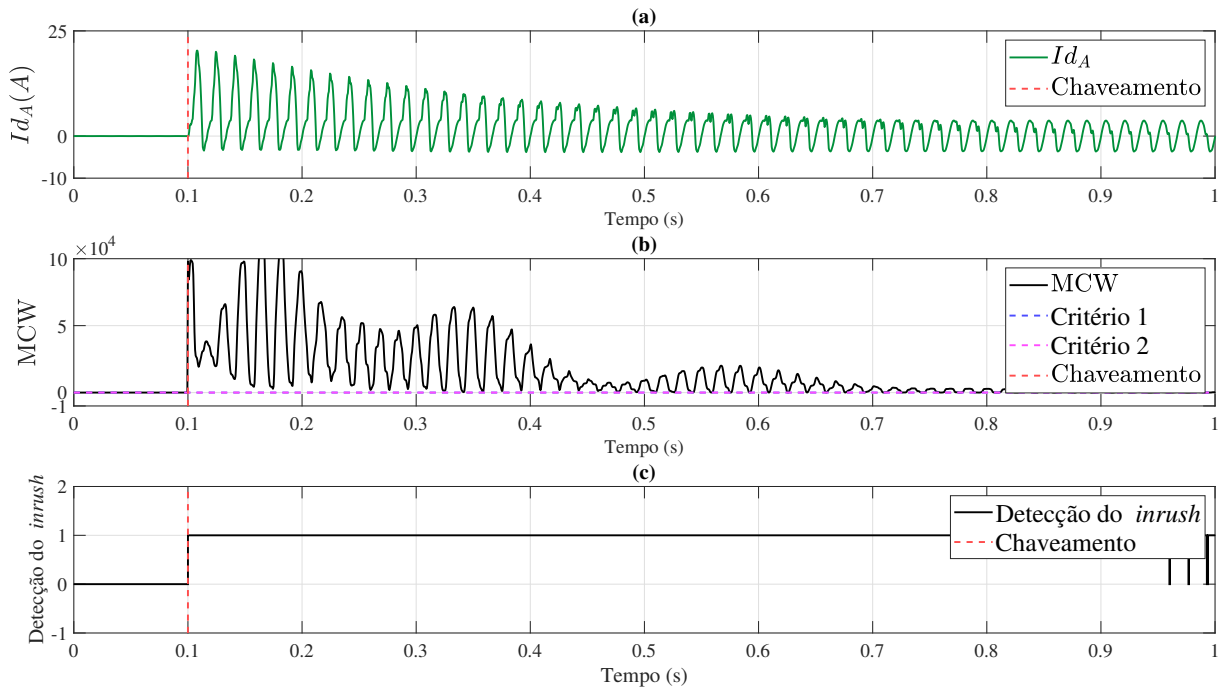
Fonte: Autor.

Figura 38 – Simulação do caso 2 para o MTEO. (a) Sinal de corrente diferencial fase A. (b) ψ_{dA} . (c) FI_A . (d) Detecção do *inrush*.



Fonte: Autor.

Figura 39 – Simulação do caso 2 para o MCW. (a) Sinal de corrente diferencial fase A. (b) MCW. (c) Detecção do *inrush*.



Fonte: Autor.

5.5 CASO 3: FALTA MONOFÁSICA-TERRA

Prosseguindo para o Caso 3, a atenção agora se volta para o cenário de falta monofásica-terra na linha de transmissão. Diferentemente das Seções anteriores, nesta etapa, a tensão no ponto de Joelho da curva de magnetização permanece inalterada com o valor fixo de 1,35 pu, focando nas variações dos instantes em que as faltas ocorrem, bem como na localização da falta ao longo da linha de transmissão. A análise considera faltas aplicadas em 0%, 25%, 50%, 75% e 100% do comprimento da linha de 100 km, mantendo os mesmos instantes de tempo do chaveamento, mas agora aplicados ao instante de incidência da falta. Os resultados dessas simulações são ilustrados nas Figuras 40 à 43.

A Figura 40 apresenta os resultados da aplicação do método DIPI em um cenário de falta monofásica na fase B, ocorrendo em 0% da linha de transmissão, com instante de ocorrência igual a 0,1 s. No gráfico (a), é exibido o sinal de corrente diferencial da fase B (I_{dB}). Há um pequeno deslocamento DC inicial, seguido de uma oscilação contínua e regular, sem a presença de picos abruptos, comportamento esperado para uma falta.

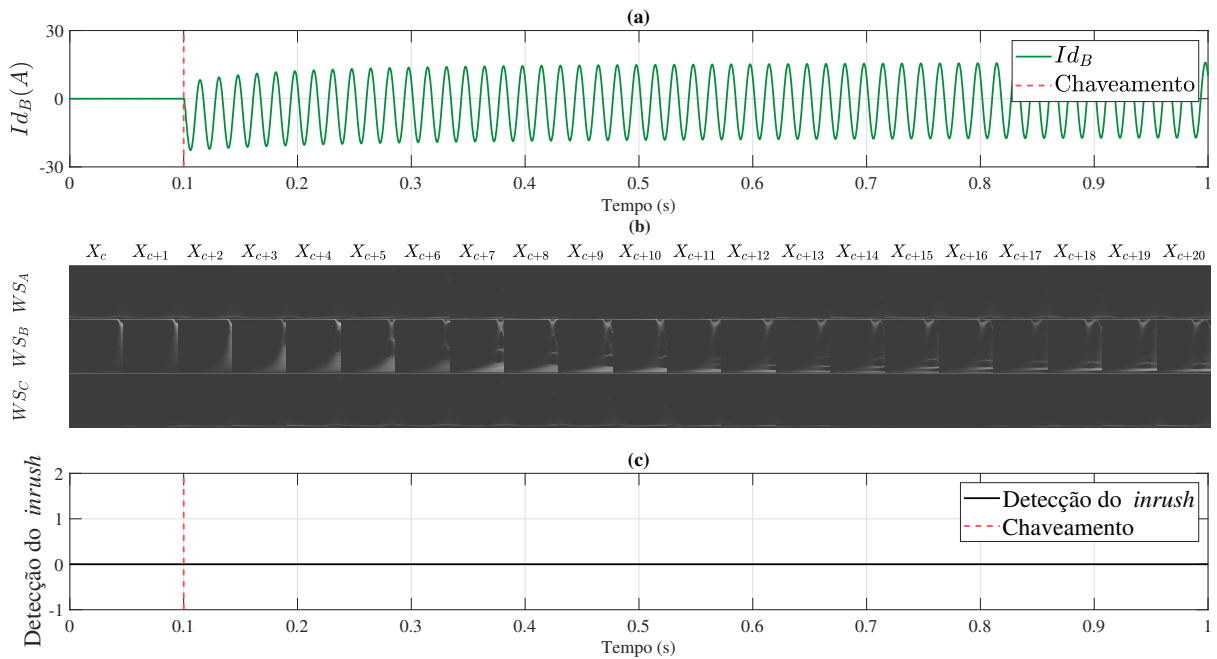
Em 40(b), são apresentados os espectrogramas. Apenas o espectrograma da fase B (WS_B) apresenta variações significativas ao longo da faixa de frequências, com comportamento repetitivo a partir de X_{c+11} , em que as componentes se concentram tanto nas faixas mais baixas quanto nas mais altas. Além disso, há uma redução na intensidade dessas componentes antes mesmo de X_{c+20} , o que reforça a não identificação do evento como *inrush* pelo algoritmo. Outro fator importante é o formato da distribuição das frequências, que difere claramente das situações analisadas nos Casos 1 e 2. As fases A e C (WS_A e WS_C) não apresentam variações, exibindo uma linha concentrada em torno de 60 Hz. Também é possível notar que as imagens geradas entre X_c e X_{c+10} se assemelham às de eventos de *inrush*. No entanto, esse comportamento é comum à maioria dos tipos de evento, pois a janela ainda está sendo preenchida e o fenômeno propriamente dito ainda não se manifestou completamente. Como discutido anteriormente, essas janelas foram classificadas como “outros eventos” durante o treinamento, justamente para evitar falsos positivos. Já em 40(c), o resultado da detecção é apresentado, que foi correta, uma vez que o método não realizou a identificação indevida do evento como *inrush*.

A Figura 41 mostra os resultados obtidos com o método MDC. O critério adotado para detecção de *inrush* estabelece que o valor deve ser inferior a 1,03 em pelo menos duas das fases. Como esse critério não foi atendido, o método não classificou a falta como um evento de *inrush*.

Avançando para a análise da Figura 42, que representa a aplicação da mesma falta, mas para o MTEO, é observado que o identificador FI_B em (c) ficou abaixo do valor de 0,2, indicando que não houve uma detecção do *inrush* segundo os parâmetros do MTEO.

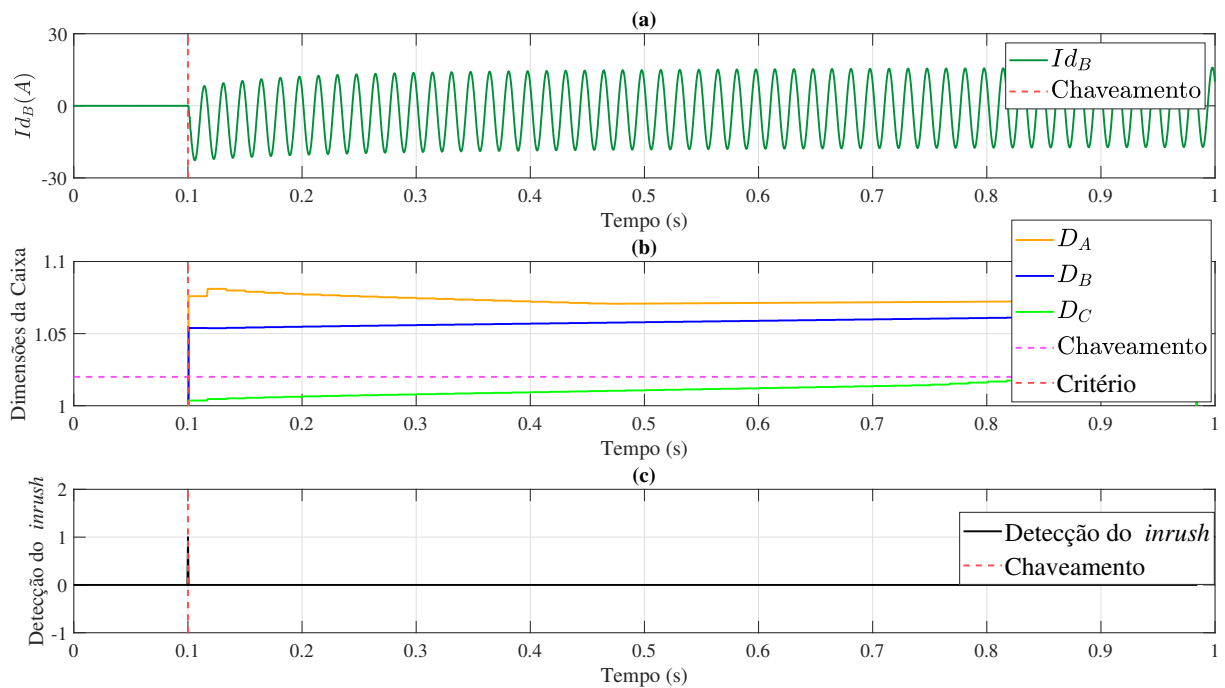
Na Figura 43, é apresentado o resultado para o MCW. Diferentemente das situações de *inrush*, em comparação à amplitude apresentada, o valor é muito menor. O critério 1 é ultrapassado, que serve para diferenciar os valores de MCW que são iguais a 0, o qual representam uma condição normal de operação. Entretanto, o critério 2 está longe de ser ultrapassado, caracterizando uma correta operação do algoritmo.

Figura 40 – Simulação do caso 3 para o DIPI. (a) Sinal de corrente diferencial fase B. (b) Espectrogramas gerados pela TWS. (c) Detecção do *inrush*.



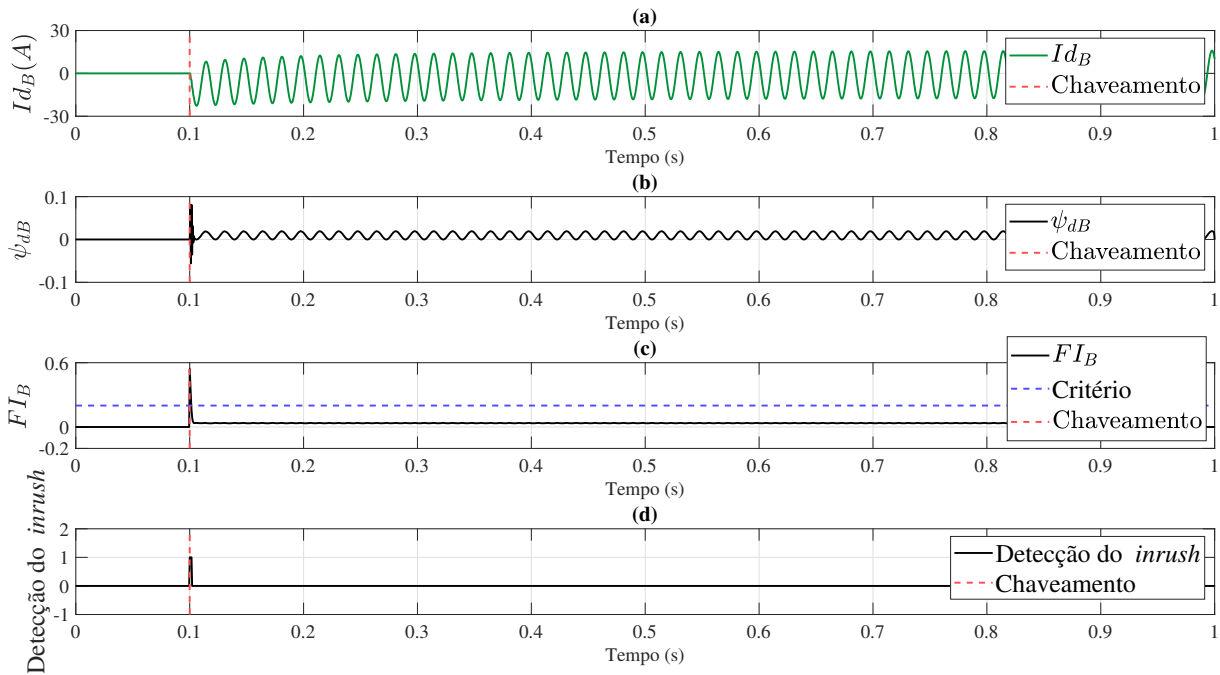
Fonte: Autor.

Figura 41 – Simulação do caso 3 para o MDC. (a) Sinal de corrente diferencial fase B. (b) Dimensões da caixa. (c) Detecção do *inrush*.



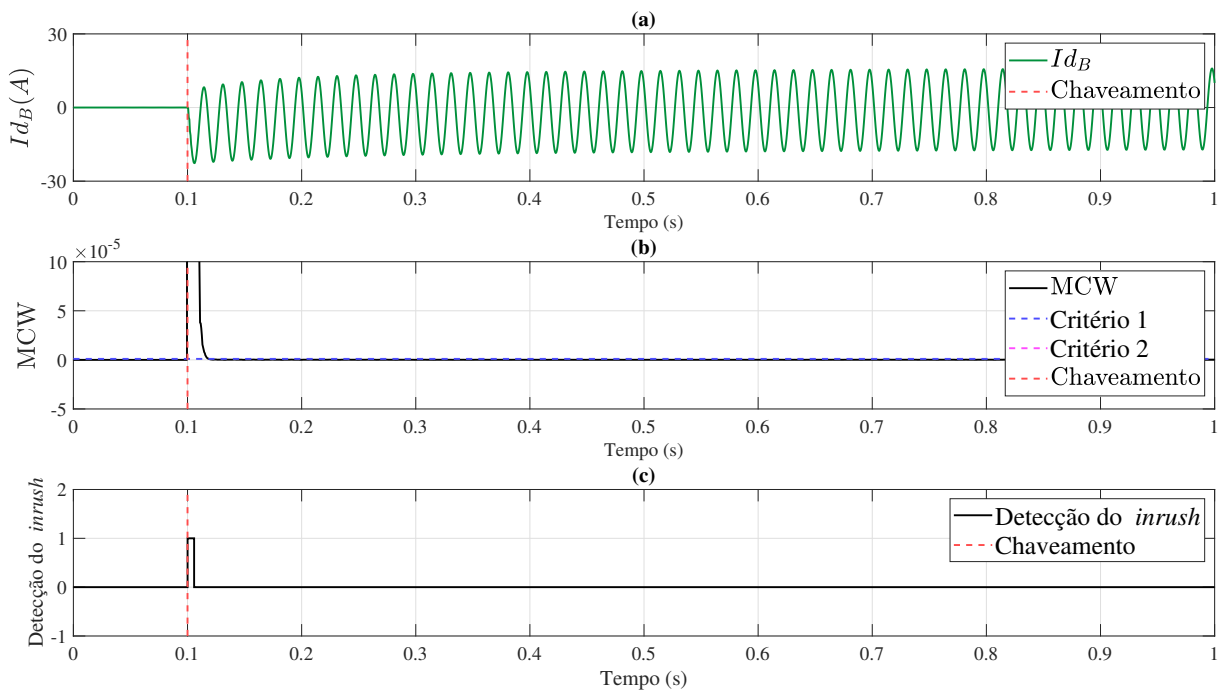
Fonte: Autor.

Figura 42 – Simulação do caso 3 para o MTEO. (a) Sinal de corrente diferencial fase B. (b) ψ_B . (c) FI_B . (d) Detecção do *inrush*.



Fonte: Autor.

Figura 43 – Simulação do caso 3 para o MCW. (a) Sinal de corrente diferencial fase B. (b) MCW. (c) Detecção do *inrush*.



Fonte: Autor.

5.6 CASO 4: FALTA BIFÁSICA-TERRA

No quarto caso de estudo, a investigação aborda faltas bifásicas-terra ao longo da linha de transmissão. A análise se concentra no resultado da interação entre duas fases e a terra. Assim como nos casos anteriores, este estudo mantém a consistência na metodologia ao aplicar os mesmos intervalos de tempo para a ocorrência das faltas. Os resultados dessas simulações são apresentados nas Figuras 44 à 47.

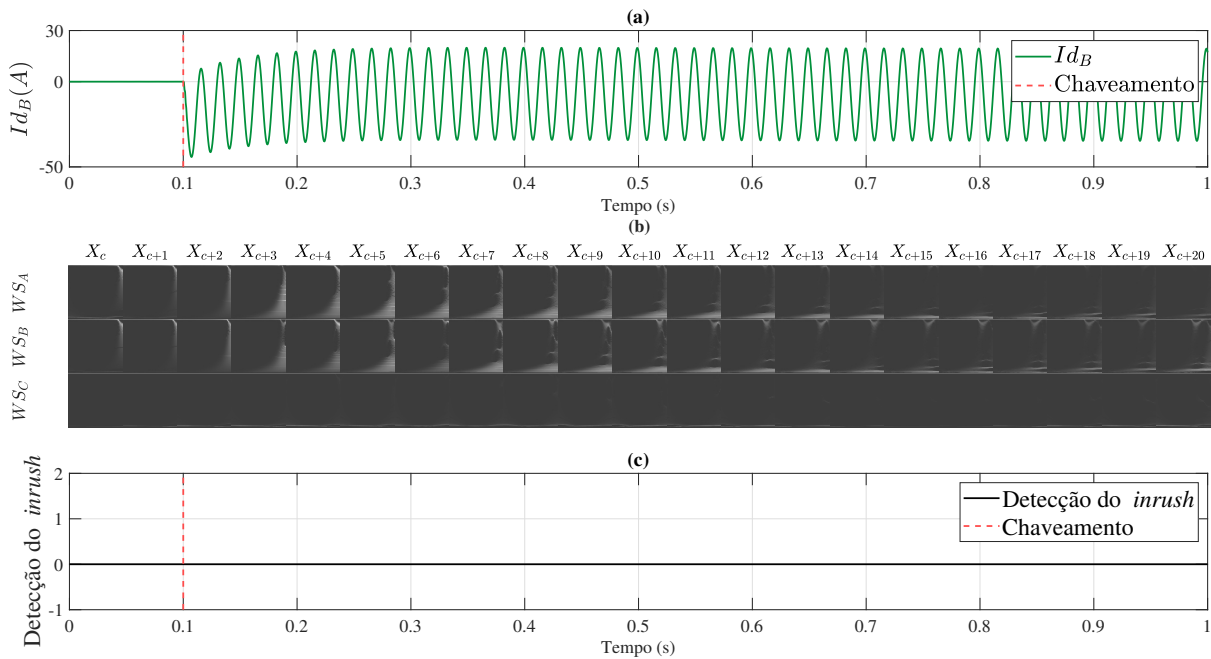
A Figura 44 apresenta os resultados para o DIPI, aplicados a uma falta bifásica-terra entre as fases A e B, ocorrida no instante de 0,1 s em 50% da linha de transmissão. No gráfico (a), é exibido o sinal de corrente diferencial I_{dB} , que apresenta um deslocamento DC inicial, mantendo, em seguida, um padrão senoidal. No gráfico (b), são mostrados os espectrogramas das três fases. É observado uma baixa intensidade das componentes espectrais, com distribuição mais evidente nas janelas finais. O comportamento de WS_A , que apresenta pouca presença de componentes ao longo da faixa de frequências; por outro lado, na fase B, há maior concentração. Além disso, o padrão visual se assemelha ao observado no Caso 3, o que é esperado para este tipo de evento.

Agora na Figura 45, em (a), novamente o sinal I_{dB} e, em (b), as dimensões das caixas. Os valores de D_A e D_B ficaram abaixo do critério estabelecido, levando o MDC a identificar incorretamente o evento como *inrush*, como representado em (c).

A Figura 46 exibe os resultados obtidos com o método MTEO. O gráfico (a) mostra o sinal da corrente diferencial I_{dB} , enquanto (b) apresenta o operador ψ do TEO para a fase B. A medida de energia revela flutuações reduzidas, com baixa concentração de componentes de alta frequência, em contraste com o comportamento típico de um evento de *inrush*. Embora o critério tenha sido ultrapassado no instante de chaveamento, o valor retornou rapidamente ao patamar abaixo do limiar. Assim, conclui-se que o MTEO não confundiu a condição de falta com um evento de *inrush*, sendo apenas afetado pelo instante de chaveamento.

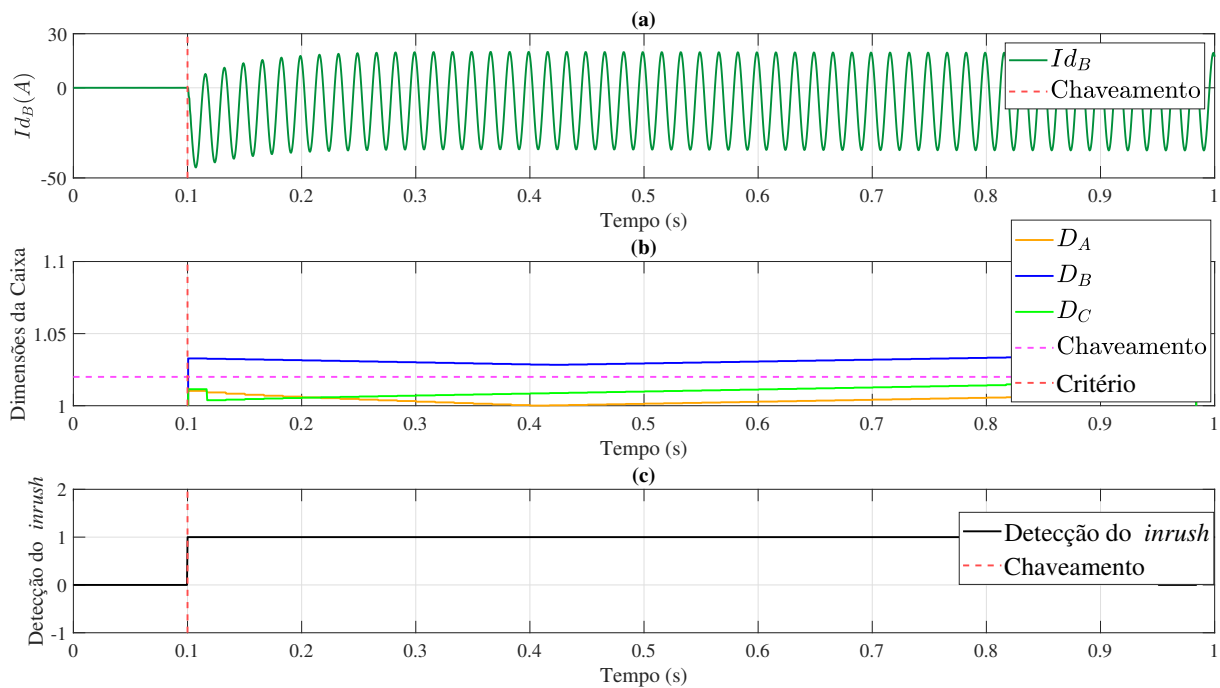
Por fim, a Figura 47 mostra os resultados para o método MCW, aplicados à mesma situação. A detecção foi acionada, pois a amplitude observada em (b) ultrapassou os dois critérios estabelecidos (2 e 0,000001). Esses limites, no entanto, não são visíveis no gráfico devido à alta amplitude do sinal — superior a 10×10^5 — causada tanto pelo instante de chaveamento quanto pelo deslocamento DC mais acentuado por se tratar de 50% da linha de transmissão.

Figura 44 – Simulação do caso 4 para o DIPI. (a) Sinal de corrente diferencial fase B. (b) Espectrogramas gerados pela TWS. (c) Detecção do *inrush*.



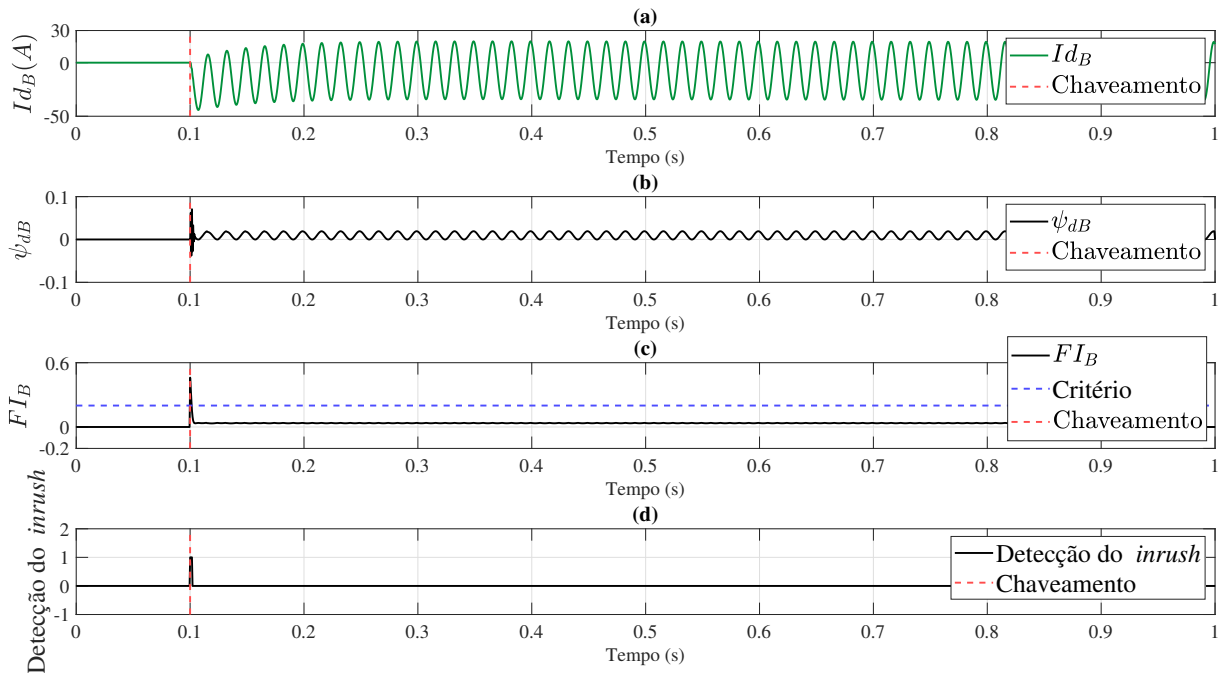
Fonte: Autor.

Figura 45 – Simulação do caso 4 para o MDC. (a) Sinal de corrente diferencial fase B. (b) Dimensões da caixa. (c) Detecção do *inrush*.



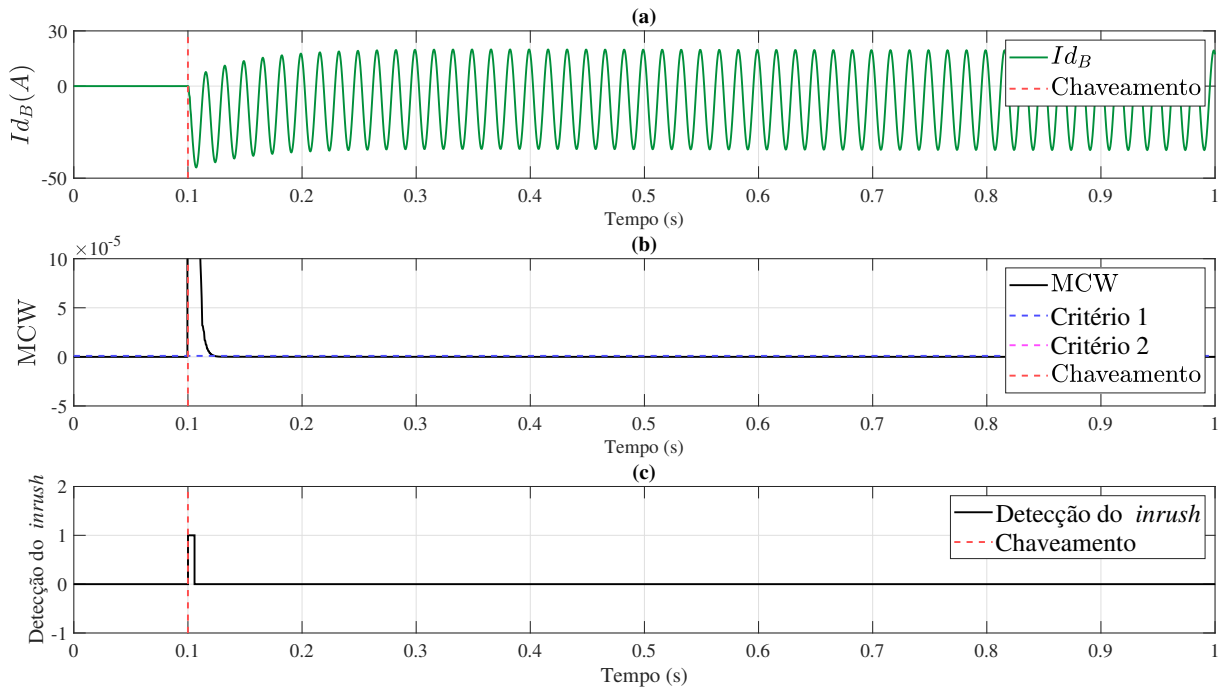
Fonte: Autor.

Figura 46 – Simulação do caso 4 para o MTEO. (a) Sinal de corrente diferencial fase B. (b) ψ_{dB} . (c) FI_B . (d) Detecção do *inrush*.



Fonte: Autor.

Figura 47 – Simulação do caso 4 para o MCW. (a) Sinal de corrente diferencial fase B. (b) MCW. (c) Detecção do *inrush*.



Fonte: Autor.

5.7 CASO 5: FALTA TRIFÁSICA-TERRA

Por fim, o quinto caso de estudo explora as faltas trifásicas, um cenário que envolve todas as três fases em contato direto com a terra. Em linha com a abordagem metodológica dos casos anteriores, este estudo também aplica os mesmos intervalos de tempo para a ocorrência das faltas. Os resultados obtidos das simulações de faltas trifásicas são demonstrados nas Figuras 48 à 51.

Na Figura 48, são apresentados os resultados da simulação utilizando o método DIPI para uma falta trifásica em 50% da linha de transmissão, ocorrida no instante de 0,1 s. No gráfico (a), o sinal da corrente diferencial I_{dC} apresenta amplitude superior à observada nos casos anteriores, além de um deslocamento DC mais acentuado na forma de onda.

Os espectrogramas exibidos em 48(b), correspondentes às fases WS_A , WS_B e WS_C , evidenciam uma presença maior de componentes em grande parte da faixa de frequências. No entanto, tanto o formato quanto a intensidade dessas componentes diferem de uma situação de *inrush*, apresentando uma estrutura semelhante à letra “Y” (quando observado do topo à base) e maior concentração de energia nas faixas de baixa frequência. É destacado, ainda, a quase ausência de componentes espectrograma de WS_A .

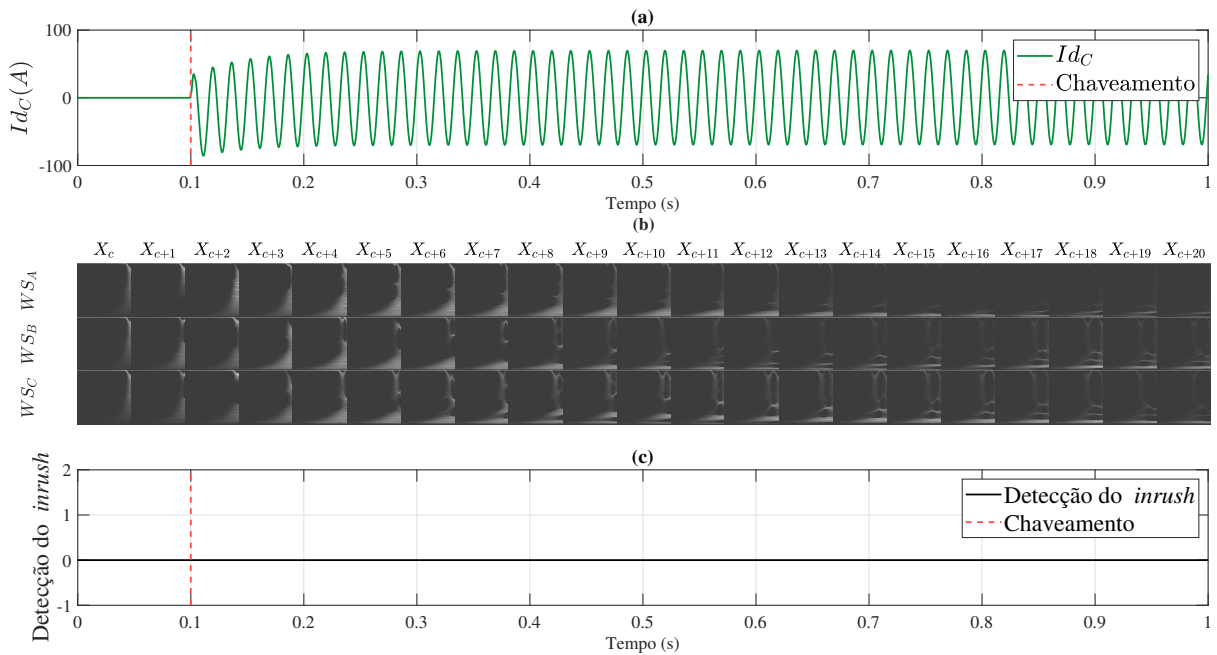
O algoritmo proposto atuou corretamente, conforme indicado em 48(c), ao não identificar erroneamente a falta trifásica como uma energização do transformador. Observa-se, contudo, que as imagens referentes aos instantes de X_{c+6} a X_{c+10} podem apresentar semelhanças visuais com as situações dos Casos 1 e 2. Esse aspecto, no entanto, foi considerado no processo de treinamento, como discutido anteriormente.

Na Figura 49, as dimensões das caixas D_A , D_B e D_C são apresentadas em (b). Os valores de D_B e D_C ultrapassaram o critério estabelecido e, portanto, o MDC não classificou erroneamente o evento como uma energização. Relembrando que, o evento só é identificado como *inrush* se pelo menos duas fases apresentarem valores abaixo de 1,02. Dessa forma, o método operou corretamente, embora tenha sido levemente influenciado pelo instante de chaveamento, como pode ser observado em (c).

A Figura 50 mostra os resultados do método MTEO aplicado à mesma simulação de falta trifásica em 50% da linha de transmissão. O índice F_I permaneceu abaixo do critério estabelecido, indicando que o método não detectou aumento significativo nas flutuações de energia, típicas de um evento de *inrush*.

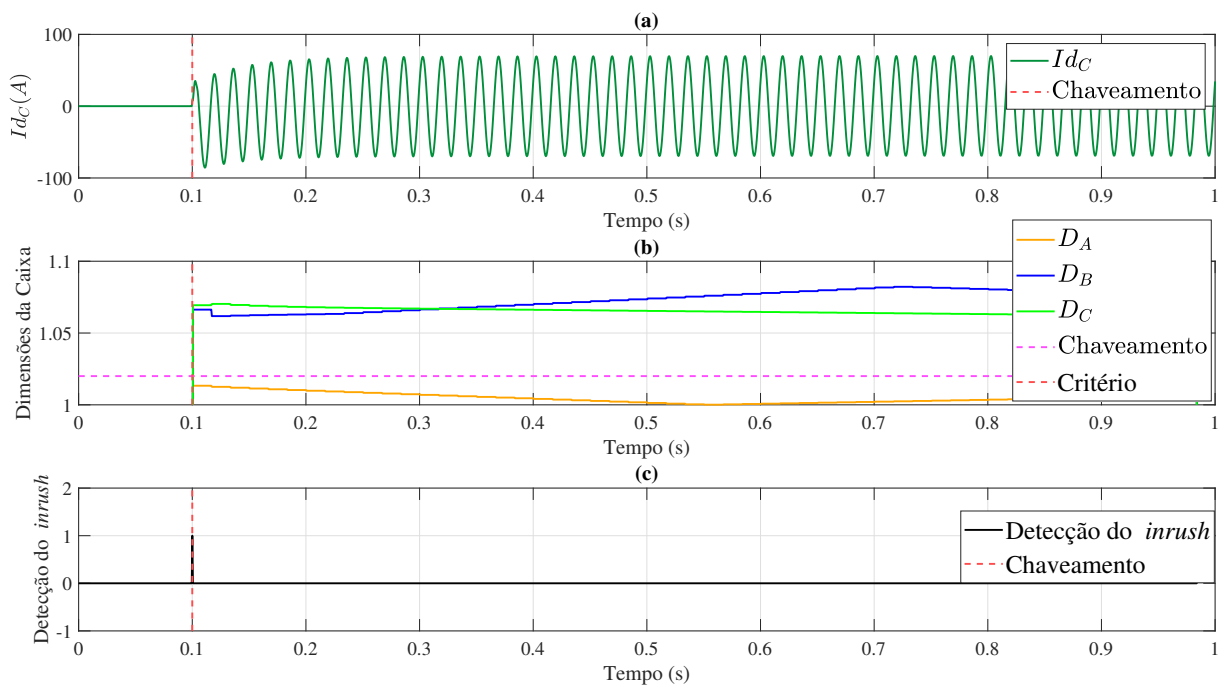
Por fim, a Figura 51 apresenta os resultados para o método MCW. Em (b), a amplitude do sinal foi baixa, não ultrapassando o critério 2. Apesar de o valor ter excedido momentaneamente 5×10^{-5} logo após o chaveamento — possivelmente devido ao deslocamento DC — o critério 2 permaneceu não atendido. Em (c), é possível observar que o método distinguiu corretamente o evento, não sendo influenciado pelo instante de chaveamento, e operando de forma robusta.

Figura 48 – Simulação do caso 5 para o DIPI. (a) Sinal de corrente diferencial fase C. (b) Espectrogramas gerados pela TWS. (c) Detecção do *inrush*.



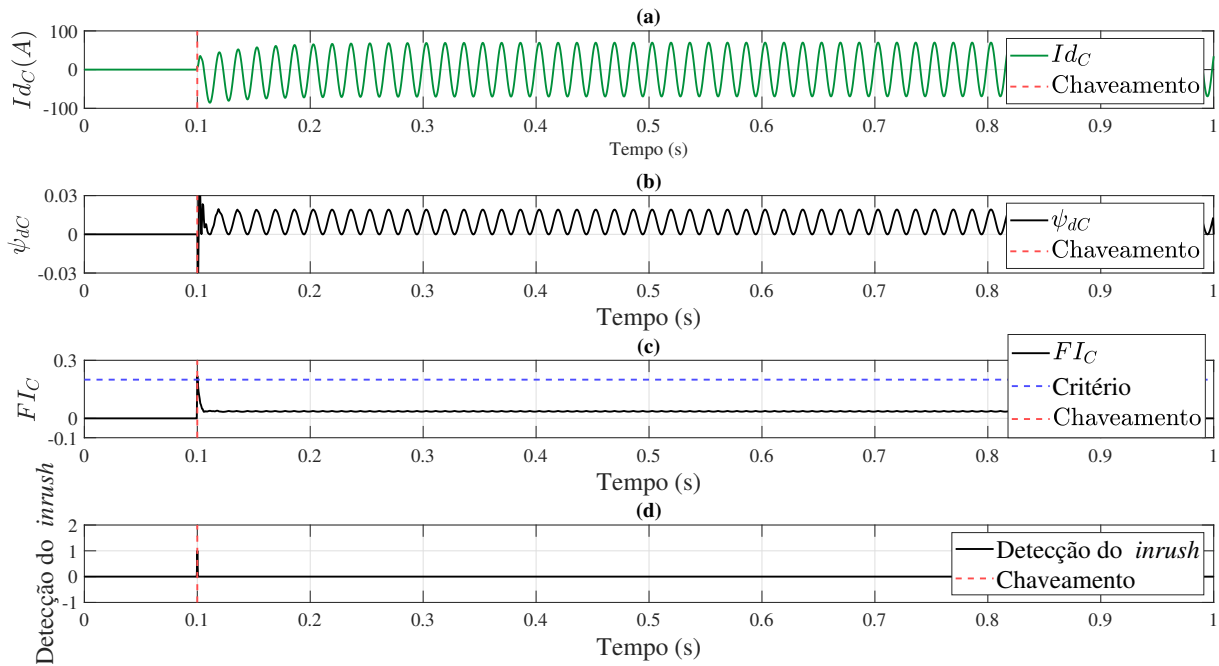
Fonte: Autor.

Figura 49 – Simulação do caso 5 para o MDC. (a) Sinal de corrente diferencial fase C. (b) Dimensões da caixa. (c) Detecção do *inrush*.



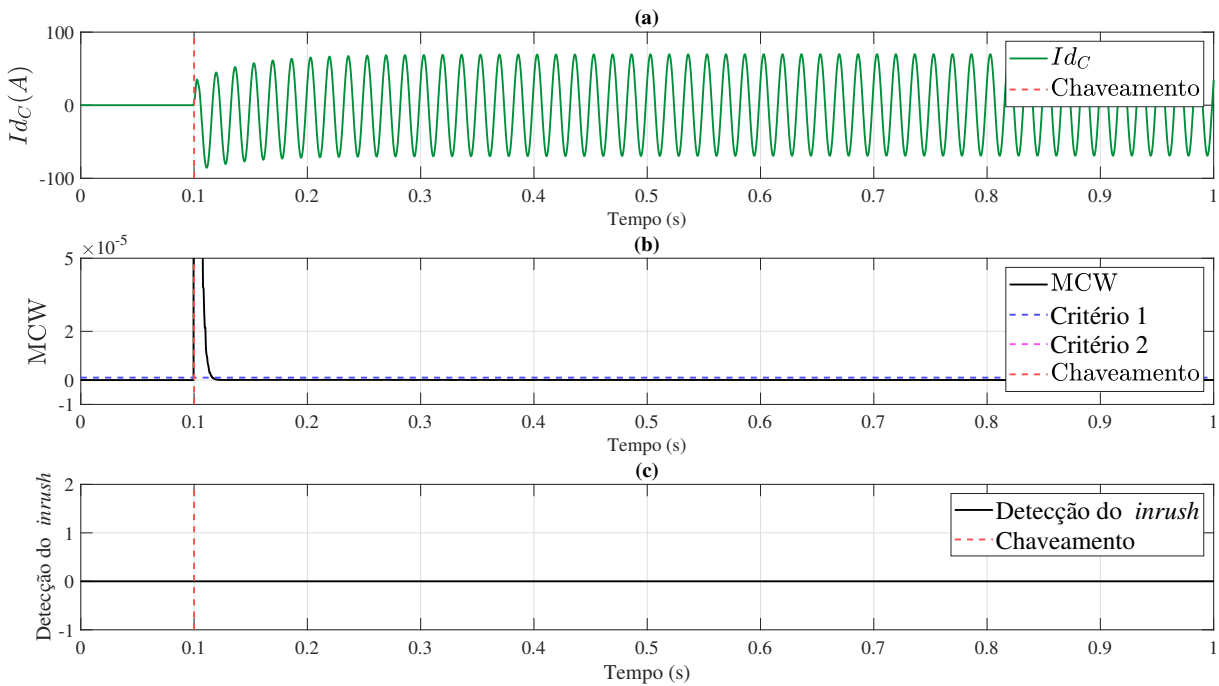
Fonte: Autor.

Figura 50 – Simulação do caso 5 para o MTEO. (a) Sinal de corrente diferencial fase C. (b) ψ_{dC} . (c) $F I_C$. (d) Detecção do *inrush*.



Fonte: Autor.

Figura 51 – Simulação do caso 5 para o MCW. (a) Sinal de corrente diferencial fase C. (b) MCW. (c) Detecção do *inrush*.



Fonte: Autor.

5.8 DISCUSSÕES SOBRE OS RESULTADOS

As Tabelas 3, 4 e 5 a seguir, apresentam os resultados referentes à energização do transformador com e sem carga e para faltas, considerando uma taxa de 32 amostras por ciclo. As Tabelas 3 e 4 mencionadas demonstram a performance dos algoritmos, onde as marcações ✓ simbolizam a operação correta do algoritmo, e × denota a operação incorreta. O fenômeno de *inrush* é identificado nas tensões situadas nos pontos críticos da curva de saturação, especificamente para os valores de 1, 1,02, 1,05, 1,15, 1,2 e 1,5 p.u., levando a uma maior saturação magnética e, como resultado, um aumento na corrente de magnetização exigida pelo enrolamento primário para estabelecer o fluxo magnético equivalente. Para essas tensões, tanto os casos com carga, como sem, vão sempre apresentar o *inrush*, diferenciando em suas amplitudes e características da forma de onda.

Do ponto de vista analítico, o MDC apresentou limitações na identificação da corrente de *inrush* durante a energização do transformador sem carga. O algoritmo de detecção demonstrou intermitência considerável ao longo do tempo, embora em determinados casos, como parar chaveamentos em 0,104167 s e 0,112503 s, o método tenha demonstrado bom desempenho nas condições de tensão no joelho da curva de 1 a 1,2 pu, conforme a Tabela 3, em outros cenários o comportamento foi instável. Especialmente, quando a detecção inicial ocorre de forma correta, é notável que o algoritmo, em certos momentos, interrompe indevidamente a identificação por intervalos prolongados, somente retornando à operação adequada posteriormente. Adicionalmente, houve situações em que a detecção do *inrush* foi tardia, o que também contribuiu negativamente para o desempenho final. Como resultado dessas falhas, o desempenho do método MDC foi de 51,4%.

Além disso, o MDC enfrentou as mesmas dificuldades na detecção do *inrush* em casos de energização com carga, porém mais acentuadas e em grande parte atribuído à intermitência do sinal de detecção. Isso implica que, embora o método tenha sido capaz de reconhecer o *inrush* na maioria das situações, não manteve a detecção por um período suficientemente longo para prevenir falsos disparos para uma possível aplicação em um relé digital.

Ao analisar o MTEO, é possível perceber que este apresentou bons resultados tanto para a energização do transformador sem carga (Tabela 3) quanto com carga (Tabela 4). No entanto, durante a energização em vazio, foram identificadas dificuldades de atuação adequada do algoritmo, especificamente, nos casos com tensão no joelho da curva de 1,0 p.u. e 1,5 p.u. Essas falhas ocorreram, em parte, devido à intermitência do sinal de detecção, o que comprometeu a identificação do fenômeno.

Conforme discutido anteriormente, a forma de onda associada ao *inrush* apresenta características plenamente evidentes para a tensão de 1,0 p.u., enquanto em 1,5 p.u. essas características são visivelmente menos acentuadas. Nesta última condição, as variações detectadas pelo operador do algoritmo não foram significativas a ponto de exceder o critério estabelecido, resultando, portanto, em atuação indevida.

Quanto aos cenários de energização com carga, o MTEO demonstrou ótimos resultados,

com falha de atuação registrada em apenas uma condição específica: 1,5 p.u. no instante de chaveamento de 0,112503 s.

Para o MCW, o resultado apresentado foi satisfatório na energização sem carga. No entanto, a atuação incorreta foi constatada pela amplitude do MCW, que mostrou uma grande variação em alguns casos com 1,5 p.u. E especificamente no instante de chaveamento de 0,1 s, com uma tensão no joelho da curva de 1,2 p.u. Adicionalmente, para as situações sob carga, o método demonstrou um desempenho de 88,6%, com erros ocorrendo em 1,5 p.u.

Ainda no que se refere às situações de *inrush*, o método proposto DIPI demonstrou desempenho de 100% tanto nas condições de energização com carga quanto sem carga. Esse resultado pode ser atribuído, em grande parte, à abordagem diferenciada adotada pelo método. Ao contrário das metodologias anteriores, que se baseiam na definição de um parâmetro fixo, como um *threshold* para realizar a detecção, o DIPI fundamenta sua atuação na análise das imagens com características tempo-frequência extraídas de situações de *inrush* e de falta.

Em contraste, é destacado a importância de não apenas detectar a corrente de *inrush*, mas também evitar sua identificação equivocada em outro tipo de evento, como a falta. A Tabela 5 apresenta um resultado sintetizado, considerando que, para cada tipo de falta, foram avaliados cinco pontos de falta ao longo da linha de transmissão: 0%, 25%, 50%, 75% e 100%. Assim, o símbolo ✓ indica uma atuação correta para todas as porcentagens, ✓* refere-se a atuações corretas em apenas alguns pontos e × representa uma atuação incorreta em todas elas, ou seja, o evento de falta foi erroneamente identificado como *inrush*.

Três dos quatro métodos analisados apresentaram bons resultados. Observa-se, na Tabela 5, que o método proposto obteve o melhor desempenho, embora tenha falhado nas situações de falta trifásica nos pontos de 75% e 100% da LT, bem como na falta bifásica do tipo BC em 100% da LT, especificamente nos instantes indicados por ✓*. Nessas circunstâncias, o espectrograma gerado apresentou uma forma de onda semelhante à de uma situação de *inrush* com carga, o que levou à falha na detecção. Esse comportamento pode ser atribuído, em parte, à combinação entre o instante específico de chaveamento e a presença mais elevada de componentes harmônicas nesses casos.

Na sequência, os métodos MDC e MTEO também apresentaram bom desempenho. No entanto, o MDC demonstrou maior variabilidade nas atuações incorretas, especialmente em faltas bifásicas-terra do tipo BC e em algumas situações de faltas monofásicas. Por sua vez, o MTEO também apresentou falhas nas faltas bifásicas-terra, com atuações incorretas em todas as porcentagens da LT para a falta BC no instante de chaveamento de 0,112503 s, além de erros pontuais para a falta entre as fases CA e alguns casos de faltas monofásicas. Apesar dessas limitações, ambos os métodos obtiveram bons resultados em cenários como a falta trifásica-terra.

Por fim, o método MCW foi o que apresentou o pior desempenho entre os analisados, com falhas significativas nas porcentagens de 75% e 100% da LT, independentemente do tipo de falta. Isso pode ser explicado pela maior influência da componente DC e pelo comportamento harmônico mais acentuado nesses pontos da linha.

Tabela 3 – Resultado das simulações para 32 amostras/ciclo para energização do transformador sem carga.

C A S O	32 amostras/ciclo									
	Método	Fechamento da chave (s)	Detecção do <i>inrush</i>						Desempenho	
			Tensão no joelho da curva (pu)							
			1	1,02	1,05	1,1	1,15	1,2		1,5
MDC	0,1	✓	×	×	×	×	×	×	✓	51,4%
	0,104167	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	×	
	0,108335	✓	×	×	×	×	×	×	✓	
	0,112503	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	×	
	0,116670	✓	×	×	×	×	×	×	✓	
MTEO	0,1	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	×	88,6%
	0,104167	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	×	
	0,108335	×	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	0,112503	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	×	
	0,116670	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
MCW	0,1	✓	×	✓	✓	✓	✓	✓	×	82,8%
	0,104167	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	×	
	0,108335	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	×	
	0,112503	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	×	
	0,116670	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	×	
DIPI	0,1	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	100%
	0,104167	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	0,108335	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	0,112503	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	0,116670	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	

✓ Atuação correta.

× Atuação incorreta.

Fonte: Autor.

Tabela 4 – Resultado das simulações para 32 amostras/ciclo para energização do transformador com carga.

C A S O	32 amostras/ciclo								
	Método	Fechamento da chave (s)	Detecção do <i>inrush</i>						Desempenho
			Tensão no joelho da curva (pu)						
			1	1,02	1,05	1,1	1,15	1,2	
MDC	0,1	×	×	×	×	×	×	×	5,7%
	0,104167	✓	×	×	×	×	×	×	
	0,108335	×	×	×	×	×	×	×	
	0,112503	✓	×	×	×	×	×	×	
	0,116670	×	×	×	×	×	×	×	
MTEO	0,1	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	97,1%
	0,104167	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	0,108335	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	0,112503	✓	✓	✓	✓	✓	✓	×	
	0,116670	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
MCW	0,1	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	88,6%
	0,104167	✓	✓	✓	✓	✓	✓	×	
	0,108335	✓	✓	✓	✓	✓	✓	×	
	0,112503	✓	✓	✓	✓	✓	✓	×	
	0,116670	✓	✓	✓	✓	✓	✓	×	
DIPI	0,1	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	100%
	0,104167	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	0,108335	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	0,112503	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	0,116670	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	

✓ Atuação correta.

× Atuação incorreta.

Tabela 5 – Resultado das simulações para 32 amostras/ciclo para faltas monofásicas, bifásicas e trifásicas-terra.

C A S O	32 amostras/ciclo									
	Método	Fechamento da chave (s)	Não detecção das faltas						Desempenho	
			Tipos de falta							
			A	B	C	AB	BC	CA		ABC
MDC	0,1	✓*	✓*	✓	✓*	✓	✓	✓	86,3%	
	0,104167	✓*	✓	✓	✓	✓*	✓	✓		
	0,108335	✓*	✓	✓	✓*	✓	✓	✓		
	0,112503	✓	✓	✓*	✓	✓*	✓	✓		
	0,116670	✓*	✓	✓	✓*	✓	✓	✓		
F A L T A	MTEO	0,1	✓	✓	✓	✓*	✓	✓*	✓	86,9%
		0,104167	✓*	✓	✓	✓*	✓	✓*	✓	
		0,108335	✓	✓	✓*	✓*	✓	✓*	✓	
		0,112503	✓*	✓	✓	✓*	×	✓*	✓	
		0,116670	✓	✓	✓	✓*	✓	✓*	✓	
S A M P L I F I C A D O	MCW	0,1	✓*	✓*	✓*	✓*	✓*	✓*	✓*	60%
		0,104167	✓*	✓*	✓*	✓*	✓*	✓*	✓*	
		0,108335	✓*	✓*	✓*	✓*	✓*	✓*	✓*	
		0,112503	✓*	✓*	✓*	✓*	✓*	✓*	✓*	
		0,116670	✓*	✓*	✓*	✓*	✓*	✓*	✓*	
D I P I	DIPI	0,1	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	97,14%
		0,104167	✓	✓	✓	✓	✓*	✓	✓*	
		0,108335	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓*	
		0,112503	✓	✓	✓	✓	✓*	✓	✓*	
		0,116670	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	

✓ Atuação correta.

✓* Atuação correta em algumas porcentagens da LT.

× Atuação incorreta em todas as porcentagens da LT.

Fonte: Autor.

6 CONCLUSÕES

6.1 CONCLUSÕES

Este estudo expôs as características essenciais da corrente de *inrush* observada durante a energização de transformadores de potência. Inicialmente, é estabelecido uma base teórica para facilitar a compreensão dos capítulos seguintes, detalhando os princípios fundamentais dos transformadores, incluindo a construção básica e o fenômeno da indução eletromagnética. Posteriormente, é abordado o processo de excitação do transformador, um aspecto crucial para compreender a saturação do transformador e seu impacto nas características da onda de *inrush*, além de explorar os aspectos principais desse fenômeno transitório. O estudo avaliou três métodos da literatura: o Método da Dimensão da Caixa (MDC), o Método da Transformada de Energia Operacional (MTEO) e o Método da Correlação Wavelet (MCW). E, também, foi proposto um novo método baseado na Transformada Wavelet Sincronizada e no algoritmo Bag of Features (DIPI).

Utilizando o software PSCAD, foi simulado um sistema teste com um transformador de 30 MVA e 230 kV/13.8 kV, simulando condições de energização com e sem carga, além de faltas em diferentes partes da linha de transmissão. As simulações, apoiadas pela teoria, revelaram que a corrente de *inrush* é influenciada principalmente pelo ângulo de chaveamento. A corrente de magnetização decai rapidamente, mas sua alta magnitude pode fazer com que o relé confunda o evento com uma falta, abrindo o disjuntor e provocando uma operação inadequada do sistema de proteção.

Apesar de ser um método com fundamentação fractal robusta, o MDC apresentou os piores resultados entre os analisados. Sua principal limitação está na forma de processamento sequencial por ciclos completos, o que compromete a detecção rápida e precisa do evento de *inrush*. Além disso, demonstrou intermitência significativa e atuação tardia em diversos casos, tanto na energização com carga quanto sem carga. Porém, ele foi melhor nas situações de não identificar erroneamente o evento como uma falta, em comparação com seu desempenho no *inrush*.

O MTEO apresentou desempenho superior na maioria dos testes. Sua eficiência na identificação da energização do transformador se mostrou consistente, com baixa taxa de falsos positivos. Ainda assim, houve falhas pontuais para tensões no joelho da curva muito elevadas (1,5 pu), nas quais a forma de onda do *inrush* se torna mais sutil.

O MCW também se mostrou eficiente, principalmente devido à diferença de amplitude que consegue detectar entre as formas de onda de falta e de *inrush*. Contudo, seu desempenho foi comprometido em situações com deslocamento DC acentuado, especialmente nas faltas mais distantes ao longo da linha de transmissão.

Proposta deste Trabalho, o método DIPI apresentou o melhor desempenho geral. Sua abordagem diferenciada, baseada na representação visual dos espectrogramas gerados pela TWS e classificação com BoF, permitiu identificar corretamente todos os casos de *inrush*, com 100%

de desempenho nas energizações com e sem carga. Além disso, a proposta obteve excelente desempenho na distinção entre eventos de *inrush* e faltas, mesmo sob condições adversas.

Os resultados obtidos demonstram que a análise tempo-frequência, aliada a técnicas de classificação por imagens, é uma abordagem promissora na detecção de *inrush*. O uso da TWS permite maior concentração de energia no espectro e revela padrões que facilitam a separação entre eventos distintos. Ao utilizar essas informações como entradas para o BoF, o classificador consegue captar sutilezas visuais importantes, ignoradas por métodos que analisam exclusivamente os valores numéricos das faixas de frequência.

Conforme destacado nos Capítulos iniciais, a ausência de uma metodologia consensual na literatura torna necessária a análise dessas técnicas e a implementação de novos métodos. Futuras etapas deste trabalho incluirão a validação de estudos existentes na literatura, o desenvolvimento de uma nova técnica de detecção e a validação das técnicas implementadas em outros sistemas de teste sob condições de energização solidária e saturação do transformador de corrente, além de avaliar o desempenho com diferentes taxas de amostragem.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros, são listadas:

- Avaliar o desempenho de outras metodologias;
- Propor novas metodologias de detecção de *inrush*;
- Aplicar as metodologias em diferentes transformadores e sistemas teste;
- Avaliar o desempenho das metodologias frente à distorção harmônica dos sinais, bem como para sinais distorcidos por ruído;
- Avaliar o desempenho das metodologias para o caso de *inrush* simpático; e
- Aprimorar o algoritmo do DIPI para realizar a detecção utilizando menos ciclos do sinal

REFERÊNCIAS

- AFRASIABI, S. et al. Fast grnn-based method for distinguishing inrush currents in power transformers. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Institute of Electrical and Electronics Engineers, v. 69, n. 8, p. 8501 – 8512, 2022. ISSN 0278-0046. Citado na página 26.
- AGASTI, S. K.; NARESH, R.; GHOSH, N. Investigation of various affecting factors and reduction technique of transformer magnetizing inrush current. In: *2016 International Conference on Computation of Power, Energy Information and Commuincation (ICCPEIC)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 307–310. Citado na página 40.
- ANDERSON, P. *Power System Protection*. McGraw-Hill, 1999. (IEEE Press power engineering series). ISBN 9780071343237. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=eP9qQgAACAAJ>>. Citado na página 36.
- ANGRISANI, L. et al. Identification and classification of transformers current transients through huang hilbert transform. *Measurement*, v. 125, p. 123–132, 2018. ISSN 0263-2241. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224118303622>>. Citado na página 26.
- AUGER, F.; FLANDRIN, P. Improving the readability of time-frequency and time-scale representations by the reassignment method. *IEEE Transactions on Signal Processing*, v. 43, n. 5, p. 1068–1089, 1995. Citado 2 vezes nas páginas 56 e 57.
- BALAGA, H.; GUPTA, N.; VISHWAKARMA, D. N. Ga trained parallel hidden layered ann based differential protection of three phase power transformer. *International Journal of Electrical Power Energy Systems*, v. 67, p. 286–297, 2015. ISSN 0142-0615. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061514007108>>. Citado na página 25.
- BALAMURUGAN, S.; RATHINAM, A. Mathematical morphology based inrush blocking scheme in transformer protection. In: *2017 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / ICPS Europe)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–5. Citado na página 41.
- BANDEIRA, J. H. L.; SAMPAIO, R. F.; PONTES, R. S. T. Simulation of inrush currents in a wind power plant using atp draw. In: *2018 Simposio Brasileiro de Sistemas Eletricos (SBSE)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–6. Citado na página 40.
- BAY, H.; TUYTELAARS, T.; GOOL, L. V. Surf: Speeded up robust features. In: LEONARDIS, A.; BISCHOF, H.; PINZ, A. (Ed.). *Computer Vision – ECCV 2006*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2006. p. 404–417. ISBN 978-3-540-33833-8. Citado na página 60.
- BEHVANDI, A.; SEIFOSSADAT, S. G.; SAFFARIAN, A. A new method for discrimination of internal fault from other transient states in power transformer using clarke’s transform and modified hyperbolic s-transform. *Electric Power Systems Research*, v. 178, p. 106023, 2020. ISSN 0378-7796. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779619303426>>. Citado na página 26.
- BLACKBURN, J. L.; DOMIN, T. J. *Protective relaying: principles and applications*. [S.l.]: CRC press, 2006. Citado 2 vezes nas páginas 38 e 45.
- BO, Z.; WELLER, G.; LOMAS, T. A new technique for transformer protection based on transient detection. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 15, n. 3, p. 870–875, 2000. Citado na página 22.

CAO, W. et al. Method to identify transformer sympathetic inrush based on time-domain variation characteristics of aperiodic component. In: *2018 IEEE Power Energy Society General Meeting (PESGM)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–6. Citado na página 42.

CHAI, J.; ZHENG, Y.; PAN, S. Rotating phasor-based algorithm for the identification of inrush currents of three-phase transformers. *Electric Power Systems Research*, v. 214, p. 108936, 2023. ISSN 0378-7796. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779622009877>>. Citado na página 27.

DAUBECHIES, I.; LU, J.; WU, H.-T. Synchrosqueezed wavelet transforms: An empirical mode decomposition-like tool. *Applied and Computational Harmonic Analysis*, v. 30, n. 2, p. 243–261, 2011. ISSN 1063-5203. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1063520310001016>>. Citado 2 vezes nas páginas 56 e 57.

DAUBECHIES, I.; MAES, S. A nonlinear squeezing of the continuous wavelet transform based on auditory nerve models. In: _____. [S.l.: s.n.], 1996. ISBN 9780203734032. Citado 3 vezes nas páginas 55, 56 e 57.

DEGENS, A. Algorithm for a digital transformer differential protection based on a least-squares curve-fitting. *IEE Proceedings C (Generation, Transmission and Distribution)*, v. 128, p. 155–161(6), May 1981. ISSN 0143-7046. Disponível em: <<https://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/ip-c.1981.0026>>. Citado na página 21.

FAKRUDDIN, D. et al. Application of haar functions for transmission line and transformer differential protection. *International Journal of Electrical Power Energy Systems*, v. 6, n. 3, p. 169–180, 1984. ISSN 0142-0615. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0142061584900267>>. Citado na página 21.

GOMEZ-MORANTE, M.; NICOLETTI, D. A wavelet-based differential transformer protection. In: *IEEE Power Engineering Society. 1999 Winter Meeting (Cat. No.99CH36233)*. [S.l.: s.n.], 1999. v. 2, p. 1045 vol.2–. Citado na página 22.

GONG, M. et al. A method for identification of transformer inrush current based on box dimension. *Mathematical Problems in Engineering*, Hindawi, v. 2017, p. 2095896, Nov 2017. ISSN 1024-123X. Disponível em: <<https://doi.org/10.1155/2017/2095896>>. Citado 3 vezes nas páginas 47, 48 e 49.

GUERREIRO, M.; PIRES, V. F. A transformer differential relay based on a multiple park transformation. In: *2007 International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*. [S.l.: s.n.], 2007. p. 400–404. Citado na página 24.

GUILLÉN, D. et al. Algorithm for transformer differential protection based on wavelet correlation modes. *IET Generation, Transmission Amp; Distribution*, v. 10, p. 2871–2879, 2016. Citado na página 26.

GUILLÉN, D. et al. Algorithm for transformer differential protection based on wavelet correlation modes. *IET Generation, Transmission Amp; Distribution*, v. 10, p. 2871–2879, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 52 e 53.

- HAN, Z. et al. A novel detection criterion for transformer inrush based on short-window filter algorithm. In: *2008 43rd International Universities Power Engineering Conference*. [S.l.: s.n.], 2008. p. 1–5. Citado na página 24.
- HASHEMINEJAD, S. A new protection method for the power transformers using teager energy operator and a fluctuation identifier index. *Electric Power Systems Research*, v. 213, p. 108776, 2022. ISSN 0378-7796. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779622008306>>. Citado 3 vezes nas páginas 49, 50 e 51.
- HAYWARD, C. D. Harmonic-current-restrained relays for transformer differential protection. *Electrical Engineering*, v. 60, n. 6, p. 377–382, 1941. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 36.
- HIJAZI, M.; BASAK, A. Analysis of integral method for fault detection in transformers. *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 29, n. 6, p. 3213–3215, 1993. Citado na página 21.
- HOROWITZ, S. H.; PHADKE, A. G.; HENVILLE, C. F. *Power system relaying*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2022. Citado 2 vezes nas páginas 44 e 45.
- JEYASURYA, B.; RAHMAN, A. G. Digital differential protection of power transformers based on walsh functions. *Transactions of CEA Engineering Operating Division*, Vol. 24, 1985. Citado na página 21.
- JEYASURYA, B.; RAHMAN, M. A. Application of walsh functions for microprocessor-based transformer protection. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, EMC-27, n. 4, p. 221–225, 1985. Citado na página 21.
- JIAO, S. et al. A new principle of discrimination between inrush current and internal short circuit of transformer based on fuzzy sets. In: *POWERCON '98. 1998 International Conference on Power System Technology. Proceedings (Cat. No.98EX151)*. [S.l.: s.n.], 1998. v. 2, p. 1086–1090 vol.2. Citado na página 22.
- JING, M. et al. A novel adaptive algorithm to identify inrush using mathematical morphology. In: *2006 IEEE PES Power Systems Conference and Exposition*. [S.l.: s.n.], 2006. p. 1020–1028. Citado na página 24.
- KASZTENNY, B.; FISCHER, N.; XIA, Y. A new inrush detection algorithm for transformer differential protection. In: *12th IET International Conference on Developments in Power System Protection (DPSP 2014)*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 1–6. Citado na página 25.
- KOTHARI, D.; NAGRATH, I. *Electric machines*. [S.l.]: Tata McGraw Hill Education Pvt. Ltd., New Delhi, 2010. v. 10. Citado 3 vezes nas páginas 33, 34 e 35.
- LI, Z. et al. Discrimination between faults and inrush currents using a feature transfer strategy-based cnn for power transformers. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v. 74, p. 1–15, 2025. Citado na página 27.
- LIN, X. ning; LIU, P.; MALIK, O. Studies for identification of the inrush based on improved correlation algorithm. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 17, n. 4, p. 901–907, 2002. Citado na página 23.
- LIU, L. A new method to identify inrush current by composite calculation. *IET Conference Proceedings*, Institution of Engineering and Technology, p. 115–115(1), January 2012. Disponível em: <<https://digital-library.theiet.org/content/conferences/10.1049/cp.2012.0045>>. Citado na página 25.

- LU, A. et al. Inrush current identification based on mathematical morphology and lssvm. In: *2024 9th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE)*. [S.l.: s.n.], 2024. p. 1195–1199. Citado na página 27.
- MA, J.; WANG, Z.; WU, J. A novel method for discrimination of internal faults and inrush currents by using waveform singularity factor. In: *2010 Conference Proceedings IPEC*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 1035–1039. Citado na página 24.
- MA, J. et al. Identifying transformer inrush current based on normalized grille curve. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 26, n. 2, p. 588–595, 2011. Citado na página 24.
- MOREIRA, R. F. P. et al. Gradient-based algorithm for the distinction of fault and inrush currents in low power transformers. In: *2021 IEEE URUCON*. [S.l.: s.n.], 2021. p. 467–471. Citado na página 26.
- MURUGAN, S. K. et al. An empirical fourier transform-based power transformer differential protection. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 32, n. 1, p. 209–218, 2017. Citado na página 26.
- NADHIRAH, N. F. et al. Mitigation on sympathetic inrush current phenomena between parallel-connected transformers using pscad/emtdc. In: *2022 IEEE International Conference on Power Systems Technology (POWERCON)*. [S.l.: s.n.], 2022. p. 1–6. Citado 2 vezes nas páginas 41 e 42.
- NISTER, D.; STEWENIUS, H. Scalable recognition with a vocabulary tree. In: *2006 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'06)*. [S.l.: s.n.], 2006. v. 2, p. 2161–2168. Citado na página 61.
- O'HARA, S.; DRAPER, B. Introduction to the bag of features paradigm for image classification and retrieval. 01 2011. Citado 2 vezes nas páginas 58 e 59.
- ORILLE-FERNANDEZ, A.; GHONAIM, N.; VALENCIA, J. A firann as a differential relay for three phase power transformer protection. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 16, n. 2, p. 215–218, 2001. Citado na página 23.
- PEREZ, L. et al. Training an artificial neural network to discriminate between magnetizing inrush and internal faults. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 9, n. 1, p. 434–441, 1994. Citado na página 22.
- RAHMAN, M. Fast algorithm for digital protection of power transformers. *IEE Proceedings C (Generation, Transmission and Distribution)*, v. 129, p. 79–85(6), March 1982. ISSN 0143-7046. Disponível em: <<https://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/ip-c.1982.0012>>. Citado na página 21.
- SADEGHI, M.; DAMCHI, Y.; SHIRANI, H. Improvement of operation of power transformer protection system during sympathetic inrush current phenomena using fault current limiter. *IET Generation, Transmission Amp; Distribution*, v. 12, p. 5968–5974, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 42 e 43.
- SCHWEITZER R.R. LARSON, A. F. J. E. An efficient inrush current-detection algorithm for digital computer relay protection of transformer. *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, 1977. Citado na página 21.

- SEN, P. *Principles of Electric Machines and Power Electronics*. Wiley, 2013. ISBN 9781118078877. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=7DvhCgAAQBAJ>>. Citado 6 vezes nas páginas 36, 37, 38, 39, 40 e 41.
- SIFUZZAMAN, M.; ISLAM, M.; ALI, M. Application of wavelet transform and its advantages compared to fourier transform. *Journal of Physical Sciences*, v. 13, p. 121–134, 2009. Citado na página 55.
- SWIFT, G.; ZHANG, Z.; MCLAREN, P. Inrush restraint algorithms for transformer differential relays. In: *IEEE WESCANEX 95. Communications, Power, and Computing. Conference Proceedings*. [S.l.: s.n.], 1995. v. 2, p. 321–328 vol.2. Citado na página 22.
- TAT-WAI, C.; CHEE-KEONG, C.; HOAY-BENG, G. Detection of magnetizing inrush current using artificial neural network. In: *Proceedings of TENCON '93. IEEE Region 10 International Conference on Computers, Communications and Automation*. [S.l.: s.n.], 1993. v. 2, p. 754–757 vol.2. Citado na página 21.
- TSAI, C.-F. Bag-of-words representation in image annotation: A review. *ISRN Artificial Intelligence*, v. 2012, 11 2012. Citado na página 59.
- WENG, H. et al. A novel criterion applicable to transformer differential protection based on waveform sinusoidal similarity identification. *International Journal of Electrical Power Energy Systems*, v. 105, p. 305–314, 2019. ISSN 0142-0615. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061518311050>>. Citado na página 26.
- WINDERS, J. *Power transformers: principles and applications*. [S.l.]: CrC Press, 2002. Citado 4 vezes nas páginas 29, 30, 31 e 32.
- WU, W. C. et al. Inrush identification by applying improved morphological gradient algorithm. In: *2013 IEEE Power Energy Society General Meeting*. [S.l.: s.n.], 2013. p. 1–5. Citado na página 25.
- YABE, K. Power differential method for discrimination between fault and magnetizing inrush current in transformers. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 12, n. 3, p. 1109–1118, 1997. Citado na página 22.
- YAN, X.; JING, M.; ZENGPING, W. Research on novel power transformer protection based on self-correction function. In: *TENCON 2005 - 2005 IEEE Region 10 Conference*. [S.l.: s.n.], 2005. p. 1–4. Citado na página 23.
- ZHANG, Q.; JIAO, S.; WANG, S. Identification inrush current and internal faults of transformer based on hyperbolic s-transform. In: *2009 4th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*. [S.l.: s.n.], 2009. p. 258–263. Citado na página 24.
- ZHAO, X.; CHAI, J.; SU, P. Identification of magnetizing inrush currents of power transformers based on features of flux locus. In: *Sixth International Conference on Electrical Machines and Systems, 2003. ICEMS 2003*. [S.l.: s.n.], 2003. v. 1, p. 317–320 vol.1. Citado na página 23.
- ZHENG, T. et al. A new approach based on the instantaneous power for transformer differential protection. In: *2004 Eighth IEE International Conference on Developments in Power System Protection*. [S.l.: s.n.], 2004. v. 1, p. 331–334 Vol.1. Citado na página 23.