

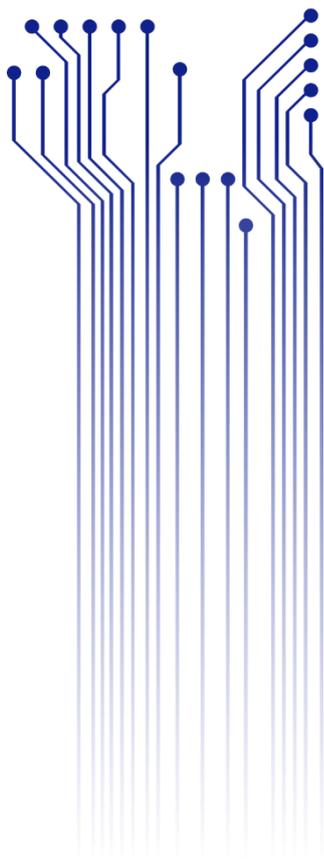
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



TALITA SANTOS ALVES CHAGAS

DISSERTAÇÃO

**UMA METODOLOGIA DE DIAGNÓSTICO DE DISTÚRBIOS EM SISTEMAS DE
DISTRIBUIÇÃO BASEADA NOS SINAIS DE CORRENTE**



São Cristóvão
2020

TALITA SANTOS ALVES CHAGAS

UMA METODOLOGIA DE DIAGNÓSTICO DE DISTÚRBIOS EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO BASEADA NOS
SINAIS DE CORRENTE

Dissertação submetida ao programa de pós-graduação em Engenharia Elétrica (PROEE), da instituição Universidade Federal de Sergipe, como parte dos requisitos para a obtenção de título de mestre em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Sistema Elétrico de Potência.

Orientador: Professor Tarso Vilela Ferreira, D. Sc.

Aprovado pelo colegiado do PROEE em / /

São Cristóvão
2020



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA-PROEE

TERMO DE APROVAÇÃO

"IDENTIFICAÇÃO DE DISTÚRBIOS EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO EXCLUSIVAMENTE
BASEADA NOS SINAIS DE CORRENTE"

Discente:

Talita Santos Alves Chagas

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Sergipe, como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Aprovada pela banca examinadora composta por:

Prof. Dr. Carlos Alberto Villacorta Cardoso (PROEE/UFS)
Presidente

Prof. Dr. Luciano de Macedo Barros (DEL/UFS)
Examinador Externo

Prof. Dra. Núbia Silva Dantas Brito (UFSCG)
Examinadora Externa

Prof. Dr. Clezio Isicaba (UFSC)
Examinador Externo

Talita Santos Alves Chagas
Candidata

Cidade Universitária "Prof. José Aloísio de Campos", 04 de junho de 2020.

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE

C433m Chagas, Talita Santos Alves
Uma metodologia de diagnóstico de distúrbios em sistemas de distribuição baseada nos sinais de corrente / Talita Santos Alves Chagas ; orientador Tarso Vilela Ferreira. - São Cristóvão, 2020.
108 f. : il.

Dissertação (mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Sergipe, 2020.

1. Engenharia elétrica. 2. Wavelets (Matemática). 3. Fourier, Transformadas de. 4. Mínimos quadrados. I. Ferreira, Tarso Vilela orient. II. Título.

CDU 621.3

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, sempre presente, aos meu pais Sueli e Alberto e ao meu esposo Wendell.

AGRADECIMENTOS

Acima de todas as coisas ao meu Deus, minha fortaleza. Obrigada por estar sempre presente e por cuidar de mim em meio às dificuldades e por nas minhas fraquezas, fazer-me ser forte. A Ti seja toda honra e toda glória. Jamais conseguiria chegar a algum lugar sem a Sua presença e sem a Sua ajuda.

Agradeço aos meus pais, Sueli e Alberto, por estarem comigo em todos os momentos de minha vida. Obrigada por cada incentivo, por cada palavra de carinho e por não medirem esforços para concretização dos meus sonhos. Vocês me ensinaram, dentre tantas coisas, a nunca desistir. Sem vocês, nada seria possível. Essa vitória também é de vocês!

Ao meu esposo, Wendell, pela força e paciência durante essa jornada. Obrigada por me aconselhar, me compreender e por me apoiar. Seu carinho e admiração me ajudaram a chegar até aqui. À sua família, a qual já faço parte, por todo apoio e carinho.

Ao meu irmão, Vinícius, pela felicidade compartilhada em cada conquista, e à minha sobrinha, Maria Alice, que mesmo tão pequena já transmite seu carinho em cada gesto e sorriso.

Ao meu orientador, Tarso Vilela Ferreira, por toda paciência, confiança, incentivo, compreensão e orientação. Aqui eu exprimo a minha eterna gratidão.

Sou muito grata a toda equipe do Laboratório de Automação, Controle e Simulação (LACS) na Universidade Federal de Sergipe (UFS), especialmente os colegas Almir Carlos dos Santos Jr., Gustavo Aragão, Bruno Silveira e Rebeca Maia, pela grande ajuda durante a rotina de experimentos e discussões tangentes à pesquisa. Agradeço, em especial, aos meus colegas de mestrado, Reginaldo Grimaldi e Erick Silva de Sá, por todo apoio e pelas conversas e discussões que contribuíram diretamente para concretização deste trabalho.

Aos meus grandes amigos Ariosvaldo Neto, Julio Cesar, Thiago Mota, André Lucas, Klaus Cavalcante, Wagner Luiz, Samara Lima, Jorge Moreira e Leones Moura pela parceria e companheirismo desde a graduação.

Agradeço igualmente aos professores do departamento de engenharia elétrica, por todo conhecimento passado e pela ajuda em questões científicas no contexto deste trabalho, em especial ao professor Jugurta Montalvão.

À EDP Brasil, financiadora do projeto que apoiou o desenvolvimento da pesquisa que frutificou nesta dissertação, em especial à engenheira Vanessa Rafaela de Souza Demuner e aos engenheiros Nilton de Oliveira Branco, André Issamu Kadowaki, Rogério Marques, Bruno dos Santos Oliveira, Alexandre Golçalves e Denis Mollica.

À ANEEL, pelo apoio institucional, por todos os dados disponibilizados.

Ao INESC P&D Brasil, instituto de ciência e tecnologia sem fins lucrativos, responsável pela gestão da pesquisa.

Ao professor Ildemar Decker, do Laboratório de Planejamento de Sistemas de Energia Elétrica (LabPlan) na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) pela grande ajuda durante o desenvolvimento da pesquisa.

Aos professores Aldebaro Klautau Júnior e Leonardo Lira, do Núcleo de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações, Automação e Eletrônica (LASSE) na Universidade Federal do Pará (UFPA), e ao engenheiro Ilan Sousa por todo apoio e interação nas inúmeras reuniões.

À CAPES, pela bolsa de estudo que recebi durante todo o mestrado.

Enfim, agradeço a todos que de alguma forma, passaram pela minha vida e contribuíram para a construção de quem sou hoje.

*“Não meça o tamanho da montanha,
fale com aquEle que pode removê-la.
Em vez de carregar o mundo nos ombros,
fale com aquEle que sustenta o Universo.”*

Max Lucado

RESUMO

Com o crescimento da demanda por energia elétrica, percebe-se que o sistema elétrico de potência brasileiro tende a ficar mais complexo, bem como vulnerável à ocorrência de vários tipos de falhas. Distúrbios causadores de interrupções no fornecimento de energia, por exemplo, são monitorados diariamente por meio de regulações de serviços de distribuição de energia. No entanto, ainda existe a necessidade de automatizar os sistemas de distribuição para que seus equipamentos, como os religadores automáticos, atuem de forma rápida, segura e eficaz durante os processos de classificação de distúrbios. De posse da informação advinda da identificação e classificação dos distúrbios, as concessionárias de energia podem atuar no sentido de minimizar sua frequência de ocorrência. A fim de atingir este objetivo, este trabalho apresenta um conjunto de métodos capazes de classificar determinados distúrbios e faltas no sistema de distribuição – curtos-circuitos, corrente de *inrush*, carga notável, distorção harmônica, desequilíbrio de corrente e variação de frequência – com base apenas da análise do comportamento de oscilografias de sinais de corrente. Essa classificação ocorre mediante a segmentação dos sinais empregando-se, majoritariamente a transformada *wavelet* discreta, via análise multirresolução. Outras técnicas, tais como transformada de Fourier e método dos mínimos quadrados, são utilizadas em segundo plano a fim de auxiliar em algumas decisões. Ao todo, uma base de dados com 510 sinais sintéticos (simulados em um sistema-teste, parametrizado com dados reais de um sistema de distribuição e construído no *software Alternative Transients Program*), e 41 sinais de correntes reais de curtos-circuitos foram aplicados com o intuito de validar a metodologia. Os resultados apontam para a viabilidade do uso do algoritmo como ferramenta para classificação de distúrbios.

Palavras-chave: Transformada *wavelet* discreta, análise multirresolução, transformada de Fourier, método dos mínimos quadrados, *wavelet* Daubechies, decomposição, distúrbios de qualidade de energia, faltas.

ABSTRACT

With a growth in demand for electrical energy, it is noticed that the Brazilian power system tends to become more complex, as well as more susceptible to the occurrence of various types of failures. Disturbances that cause interruptions in the power supply, for example, are monitored daily through regulations on energy distribution services. However, there is still a need to automate the distribution systems so their equipment, such as automatic reclosers, act swiftly, safely and effectively during the disturbance classification processes. With the information stemming from the identification and classification of disturbances, the electric power companies can act to minimize their frequency of occurrence. In order to achieve this objective, this work presents a set of methods able to classify certain disturbances and faults in the distribution system - short circuits, inrush current, connection of large loads, harmonic distortion, current unbalance and frequency variation - based only on the analysis of the behavior of current signal oscillographs. This classification occurs through the segmentation of the signals employing, mostly the discrete wavelet transform, via multiresolution analysis. Other techniques, such as the Fourier transform and the ordinary least squares, are used in the background in order to assist in some decisions. A database with 510 synthetic signals (simulated in a test system, parameterized with real data from a distribution system and built in the Alternative Transients Program software), and 41 real currents signals from short-circuit have been applied in order to validate the methods. The results indicate to feasibility of using the algorithm as a tool for classifying disturbances.

Keywords: Discrete wavelet transform, multiresolution analysis, Fourier transform, ordinary least squares, Daubechies wavelet, decomposition, power quality disturbances, faults.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Gráficos com o histórico dos indicadores DEC e FEC.....	16
Figura 2 – Gráficos com o histórico dos indicadores DEC e FEC.....	20
Figura 3 – Forma de onda típica da CI.....	28
Figura 4 – Tipos de falta: (a) curto-circuito fase-terra;(b) curto-circuito fase-fase;.....	30
Figura 5 – Processo de filtragem de um sinal no primeiro nível.	39
Figura 6 – Processo sucessivo de decomposição de um sinal S em AMR.	40
Figura 7 – Sequência das principais etapas da pesquisa.....	51
Figura 8 – Diagrama unifilar do alimentador modelado.	51
Figura 9 – Processo de classificação: Sinal monitorado.	56
Figura 10 – Processo de classificação: Ações prioritárias (classificação da CI a partir da TF).	57
Figura 11 – Processo de classificação: Ações prioritárias.....	58
Figura 12 – Processo de classificação: Ações de monitoramento (TWD).....	61
Figura 13 – Processo de classificação: Ações de monitoramento (TF).....	62
Figura 14 – Processo de classificação: Ações de monitoramento (MMQ).....	62
Figura 15 – Fenômeno CI, nó 56: (a) Corrente na fase A; (b) Espectro de frequências estimado.	64
Figura 16 – Fenômeno CI, nó 56: (a) Corrente na fase B; (b) Medida do espectro de Fourier.....	65
Figura 17 – Fenômeno CI, nó 56: (a) Corrente na fase C; (b) Medida do espectro de Fourier.....	65
Figura 18 – Curto-circuito trifásico, nó 38: (a) Corrente na fase A; (b) Medida do espectro de Fourier. ..	66
Figura 19 – Curto-circuito trifásico, nó 38: (a) Corrente na fase B; (b) Medida do espectro de Fourier. ..	67
Figura 20 – Curto-circuito trifásico, nó 38: (a) Corrente na fase C; (b) Medida do espectro de Fourier. ..	67
Figura 21 – Curto-circuito trifásico, nó 57: (a) Corrente na fase A; (b) CWD; (c) ECWD; (d) CWA; (e) ECWA.	68
Figura 22 Curto-circuito fase-terra B, nó 3: (a) Corrente na fase A; (b) CWA; (c) ECWA.	70
Figura 23 – Curto-circuito fase-terra B, nó 3: (a) Corrente na fase B; (b) CWA; (c) ECWA.	71
Figura 24 – Curto-circuito fase-terra B, nó 3: (a) Corrente na fase C; (b) CWA; (c) ECWA.	72
Figura 25 – Curto-circuito fase-fase-terra AB, nó 56: (a) Corrente na fase A; (b) CWA; (c) ECWA.	73
Figura 26 – Curto-circuito fase-fase-terra AB, nó 3: (a) Corrente na fase B; (b) CWA; (c) ECWA.	73
Figura 27 – Curto-circuito fase-fase-terra AB, nó 3: (a) Corrente na fase C; (b) CWA; (c) ECWA.	74
Figura 28 – ECWA obtida da corrente de neutro de um processamento de um curto-circuito.....	75
Figura 29 – Curto-circuito fase-fase AC, nó 34: (a) Corrente na fase A; (b) CWA; (c) ECWA.	75
Figura 30 – Curto-circuito fase-fase AC, nó 34: (a) Corrente na fase B; (b) CWA; (c) ECWA.....	76
Figura 31 – Curto-circuito fase-fase AC, nó 34: (a) Corrente na fase C; (b) CWA; (c) ECWA.....	77
Figura 32 – ECWA obtida da corrente de neutro de um processamento de um curto-circuito.....	77
Figura 33 – Curto-circuito trifásico, nó 2: (a) Corrente na fase A; (b) CWA; (c) ECWA.....	78
Figura 34 – Curto-circuito trifásico, nó 2: (a) Corrente na fase B; (b) CWA; (c) ECWA.....	79
Figura 35 – Curto-circuito trifásico, nó 2: (a) Corrente na fase C; (b) CWA; (c) ECWA.....	79
Figura 36 – Fenômeno CI, nó 17: (a) Corrente na fase A; (b) Corrente na fase B; (c) Corrente na fase C.80	80
Figura 37 – Fenômeno CI, nó 17: (a) CWD na fase A; (b) CWD na fase B; (c) CWD na fase C.	81
Figura 38 – Fenômeno CI, nó 17, na fase A: (a) Sinal completo da ECWD; (b) Vinte e cinco ciclos antes da CI; (c) 1ª amostra com CI; (d) Primeiros ciclos após o início da CI, (e) Cinco ciclo após o início da CI.	82
Figura 39 – Fenômeno CI, nó 17, na fase C: (a) Sinal completo da ECWD; (b) Vinte e cinco ciclos antes da CI; (c) 1ª amostra com CI; (d) Primeiros ciclos após o início da CI, (e) Cinco ciclo após o início da CI.	83
Figura 40 – Carga notável, nó 17: (a) Corrente na fase A; (b) Corrente na fase B; (c) Corrente na fase C.	83

Figura 41 – Carga notável, nó 17: (a) CWD na fase A; (b) CWD na fase B; (c) CWD na fase C.	84
Figura 42 – Carga notável, nó 17, na fase B: (a) Sinal completo da ECWD; (b) Vinte e cinco ciclos antes da carga notável; (c) 1ª amostra com carga notável; (d) Primeiros ciclos após o início da carga notável, (e) Cinco ciclos após o início da carga notável.....	85
Figura 43 – Interface gráfica do <i>software</i> embarcado: análise da corrente na fase A.	87
Figura 44 – Módulos estimados das correntes: (a) Corrente e módulo na fase A;.....	88
Figura 45 – Ângulos estimados das correntes: (a) Ângulo na fase A;	88
Figura 46 – Interface gráfica do <i>software</i> embarcado: análise das correntes nas fases A, B e C.....	89
Figura 47 – Curto-circuito real fase-terra A: (a) Corrente na fase A; (b) CWA; (c) ECWA.....	92
Figura 48 – Curto-circuito real fase-terra A: (a) Corrente na fase B; (b) CWA; (c) ECWA.	93
Figura 49 – Curto-circuito real fase-terra A: (a) Corrente na fase C; (b) CWA; (c) ECWA.	93
Figura 50 – Curto-circuito real fase-fase BC: (a) Corrente na fase A; (b) CWA; (c) ECWA.	94
Figura 51 – Curto-circuito real fase-fase BC: (a) Corrente na fase B; (b) CWA; (c) ECWA.....	95
Figura 52 – Curto-circuito real fase-fase BC: (a) Corrente na fase C; (b) CWA; (c) ECWA.....	95
Figura 53 – ECWA obtida da corrente de neutro de um processamento de um curto-circuito real fase-fase BC.	96
Figura 54 – Falta evolutiva: (a) Corrente na fase A; (b) CWA; (c) ECWA.	97
Figura 55 – Falta evolutiva: (a) Corrente na fase B; (b) CWA; (c) ECWA.	98
Figura 56 – Falta evolutiva: (a) Corrente na fase C; (b) CWA; (c) ECWA.	98
Figura 57 – ECWA obtida da corrente de neutro de um processamento de um curto-circuito real fase-fase BC.	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores de referência globais da DHT (em % da tensão fundamental).....	24
Tabela 2 – Relações estabelecidas para variação de frequência.	27
Tabela 3 – Evolução das técnicas de monitoramento que buscam um diagnóstico	49
Tabela 4 – Base de dados simulada.	54
Tabela 5 – Base de dados real.	55
Tabela 6 – Critérios de diferenciação.	59
Tabela 7 – Taxas de sucesso obtidas para a base de dados de curtos-circuitos simulados.	69
Tabela 7 – Ângulos estimados para as fases de corrente.....	89
Tabela 9 – Taxas de sucesso obtidas para a base de dados real.....	91

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AMR	Análise multirresolução
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ATP	<i>Alternative Transient Program</i>
CI	Corrente de inrush
CWA	Coefficientes <i>wavelet</i> de aproximação
CWD	Coefficientes <i>wavelet</i> de detalhe
db_j	<i>Wavelet</i> Daubechies
DEC	Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
DHT	Distorção harmônica total
DQE	Distúrbios de qualidade de energia
ECWA	Energia do <i>wavelet</i> de aproximação
ECWD	Energia do <i>wavelet</i> de detalhe
FEC	Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
LVQ	<i>Learning vector quantizer</i>
MMQ	Método dos mínimos quadrados
MVS	Máquinas de vetores de suporte
PRODIST	Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
QE	Qualidade de energia
RNA	Redes neurais artificiais
SD	Sistema de distribuição
SEP	Sistema elétrico de potência
TDF	Transformada discreta de Fourier
TF	Transformada de Fourier
TFJ	Transformada de Fourier janelada
TRF	Transformada rápida de Fourier
TSM	Transformada superposta modulada
TW	Transformada <i>wavelet</i>
TWC	Transformada <i>wavelet</i> contínua
TWD	Transformada <i>wavelet</i> discreta
UFPA	Universidade Federal do Pará
UFS	Universidade Federal de Sergipe

SUMÁRIO

1	Introdução	15
1.1	Motivação.....	17
1.2	Objetivos.....	20
1.2.1	Objetivo Principal.....	20
1.2.2	Objetivos Específicos	20
1.2.3	Estrutura do Trabalho	21
2	Fundamentação teórica.....	22
2.1	Distúrbios De Qualidade de Energia Elétrica	22
2.1.1	Distorção Harmônica Total	23
2.1.2	Desequilíbrio de Corrente	25
2.1.3	Variação de Frequência.....	26
2.1.4	Corrente de <i>Inrush</i>	27
2.2	Faltas.....	29
2.3	Carga Notável.....	31
2.4	Método dos Mínimos Quadrados.....	31
2.5	Transformada de Fourier.....	33
2.6	Transformada <i>Wavelet</i>	35
2.6.1	Funções <i>Wavelet</i>	36
2.6.2	A Transformada <i>Wavelet</i> Contínua.....	37
2.6.3	A Transformada <i>Wavelet</i> Discreta.....	37
2.6.4	Análise Multirresolução.....	38
3	Revisão Bibliográfica.....	41
3.1	Técnicas de Monitoramento de DQE e Faltas no SEP	41
3.1	Análise da Bibliografia	48
4	Metodologia	50
4.1	Sistema Elétrico em Estudo.....	51
4.2	Base de Dados	52
4.3	Procedimento para Classificação Geral dos Sinais	55
4.3.1	Ações Prioritárias	56
4.3.2	Ações de Monitoramento	60
5	Resultados	63

5.1	Avaliação dos Casos Simulados	63
5.1.1	Ações Prioritárias: Presença da Segunda Harmônica.....	64
5.1.2	Ações Prioritárias: Curtos-Circuitos	68
5.1.3	Ações de Monitoramento: Corrente de <i>Inrush</i> e Carga Notável.....	79
5.1.4	Ações de Monitoramento: Distorção Harmônica e Variação de Frequência	85
5.1.5	Ações de Monitoramento: Desequilíbrio de Corrente.....	87
5.2	Avaliação dos Casos Reais.....	90
5.2.1	Ações Prioritárias: Curtos-Circuitos	90
6	Conclusões e Trabalhos Futuros	100
	Referências	103

1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica é extremamente importante no mundo atualmente, afinal, trata-se de um recurso essencial para o desenvolvimento econômico de um país, sendo capaz de promover a comodidade, a satisfação e o bem-estar da sociedade. Utilizar essa energia, presente nas residências, comércios e indústrias, requer um sistema elétrico de potência (SEP) complexo e eficiente por meio do qual é possível gerar, transmitir e distribuir energia elétrica. O SEP precisa ser planejado e operado de maneira a proporcionar os melhores padrões de qualidade de energia (QE), garantindo grau de confiabilidade elevado na continuidade do fornecimento. Esse grau de confiabilidade pode ser obtido a partir da otimização dos equipamentos e das instalações presentes no SEP.

Devido à complexidade do SEP somado a outros fatores, como o crescimento da demanda por energia, a interligação de novos sistemas no SEP e o aumento de cargas não lineares, (BAGGINI, 2008), há uma maior susceptibilidade à ocorrência de perturbações, defeitos e falhas. Durante a ocorrência dos distúrbios de qualidade de energia (DQE), equipamentos e usuários beneficiados pelo SEP podem ser prejudicados devido a inúmeras interferências indesejáveis, tais como: acionamento indevido de relés, mau funcionamento de equipamentos, distorções em equipamentos de medição e, em casos extremos, interrupção do fornecimento de energia.

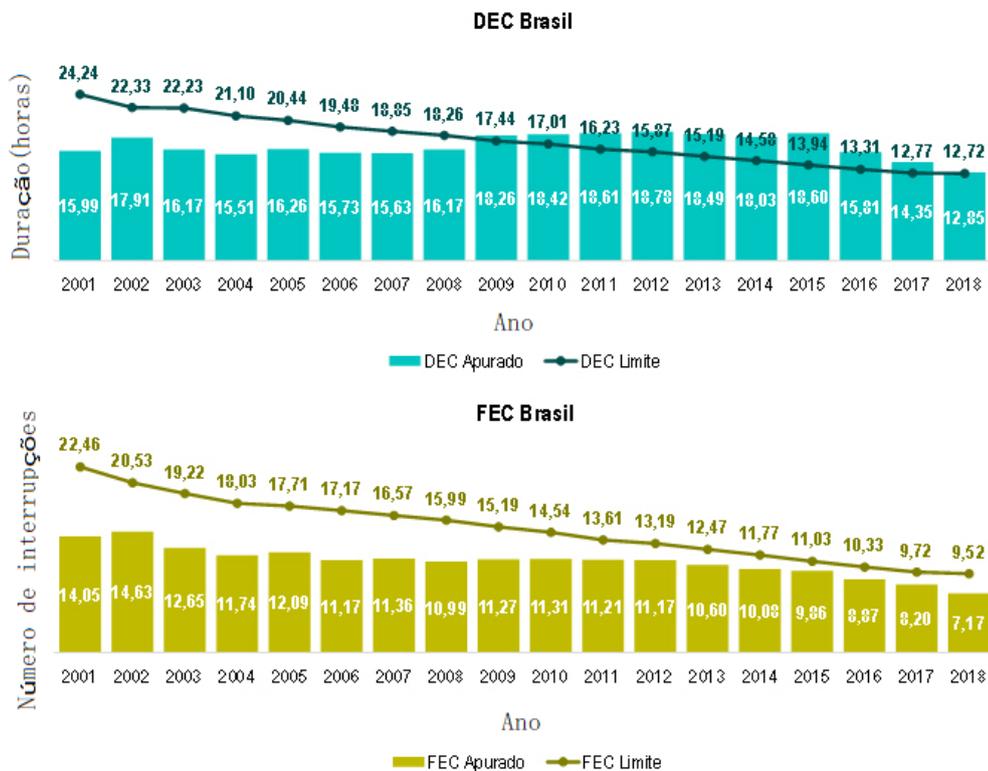
Para manter a QE, a Agência Nacional de Energia Elétrica¹ (ANEEL) emitiu o Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), o qual centraliza um conjunto de aspectos de regulação de serviços de distribuição de energia. O PRODIST, em seu módulo 8 (ANEEL, 2017), adota alguns indicadores e padrões relacionados à QE que verificam a qualidade dos serviços públicos de energia elétrica no Brasil, exigindo que as distribuidoras mantenham um padrão de continuidade. Indicadores como Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (DEC) e Frequência Equivalente de

¹ Agência reguladora e fiscalizadora, responsável por garantir a geração, transmissão, distribuição e comercialização de energia elétrica, em conformidade com as políticas e diretrizes do governo federal (ANEEL, 2017).

Interrupção por Unidade Consumidora (FEC), descritos em (ANEEL, 2017; ANEEL, 2019), são exemplos de índices relacionados, respectivamente, ao intervalo de tempo que o sistema permanece desligado e a frequência de tais desligamentos.

Na Figura 1, os gráficos com o histórico dos indicadores DEC e FEC ao longo dos anos no Brasil são observados. O DEC no ano de 2018 apresentou o menor valor histórico, atingindo o nível regulatório de 12,72. Já a FEC manteve um decréscimo ao longo dos anos, com uma redução de 8,20 interrupções em média em 2017 para 7,17 interrupções em média por consumidor em 2018, o que significa uma melhora de 12,56% no período.

Figura 1 – Gráficos com o histórico dos indicadores DEC e FEC.



Fonte: (ANEEL, 2019).

As subdivisões das distribuidoras são as encarregadas por apurarem tais indicadores, com base nos limites estabelecidos pela disponibilidade e capacidade do sistema, e os enviarem periodicamente para a ANEEL. No cálculo desses indicadores apenas as interrupções com duração superior a 3 minutos, conforme descrito em (ANEEL, 2017), são consideradas. Interrupções que ocorrem em dias críticos² não são consideradas na base de cálculos desses indicadores. De acordo com o que foi estabelecido na Resolução Normativa nº 63, de 12 de

² São considerados críticos os dias em que o número de ocorrências emergenciais ultrapassa a média acrescida de três desvios padrões dos valores diários (ANEEL, 2017).

maio de 2004, o descumprimento das metas previstas por esses índices resulta em penalidades para a concessionária, como o pagamento de multas à ANEEL.

Uma vez apontada a crescente importância de estudos na área de QE destaca-se a necessidade de otimizar os sistemas de proteção, afinal, os equipamentos de proteção mais modernos dispõem de funções de detecção e classificação das condições anormais no SEP. A principal função de um sistema de proteção é assegurar a desconexão de todo o sistema elétrico submetido a qualquer anormalidade que o faça operar fora dos limites previstos ou de parte dele (FILHO e MAMEDE, 2000).

Equipamentos como sensores, fusíveis, disjuntores, relés, seccionadores, religadores e, entre outros agem de forma seletiva nos sistemas de proteção, exercendo as funções de detecção de distúrbios e cumprindo as funções específicas de manobra e seccionamento. Esses dispositivos são capazes de promover o desacoplamento do circuito no qual a falta ocorreu, tendo como objetivo minimizar os possíveis danos decorrentes da anomalia (KINDERMANN, 1997). Os religadores automáticos, por exemplo, são programados para desarmarem e armarem (abrirem e fecharem os contatos internos) automaticamente na presença de um curto-circuito até que perceba que o curto não existe mais (FILHO e MAMEDE, 2000). Esse procedimento é realizado no máximo 3 vezes em um intervalo de tempo (tempo de religamento), ou seja, caso o curto-circuito não tenha sido extinto até a terceira vez, o religador permanecerá aberto na quarta vez. Dessa maneira, o novo fechamento só se realizará manualmente.

Descrito o funcionamento dos religadores, existe uma limitação quanto à classificação das faltas, afinal, esses equipamentos tipicamente não analisam devidamente as faltas transitórias, permitindo sua evolução para faltas permanentes. As tradicionais práticas ligadas à classificação de faltas se baseiam no julgamento dos operadores, que consideram suas experiências em análise e planejamento de ações preditivas e corretivas. A classificação automática das faltas, por sua vez, traz vantagens como: o tempo reduzido até o resultado, a confiabilidade e a objetividade. Ademais, esses equipamentos também apresentam elevados custos de aquisição e manutenção, e tendem à desatualização, dado que em muitos casos obedecem a algoritmos desenvolvidos há décadas.

1.1 MOTIVAÇÃO

O sistema de distribuição (SD) é responsável por conectar as subestações até os equipamentos de entrada do consumidor final. De acordo com (COELHO, 2005), as

interrupções ocorridas no SD causam diversos danos às distribuidoras de energia, tais como: diminuição do faturamento (por não providenciarem energia); custos com a alocação de recursos humanos para a manutenção do sistema; necessidade de pagamento de indenizações por equipamentos danificados; e entre outros.

Embora exista uma quantidade razoável de técnicas e procedimentos capazes de detectar, classificar e localizar a ocorrência de DQE e faltas e, conseqüentemente, mitigar os danos supracitados, é importante enfatizar a necessidade de uma nova metodologia capaz de monitorar a ocorrência de distúrbios a partir apenas dos sinais de corrente. Com o advento dessa metodologia, pretende-se promover a automação dos SD, (DE FREITAS, VENTURINI, *et al.*, 2019; ISSICABA, ROSA, *et al.*, 2012), para que seus equipamentos atuem de forma rápida, segura e eficaz durante os processos de classificação de faltas, tornando-os inteligentes. Com isso, ações automáticas de restabelecimento da rede serão possíveis, bem como, a atuação preventiva em eventos que evoluiriam para faltas permanentes.

Dentre os trabalhos encontrados na literatura, especificamente nos publicados por diversos grupos de pesquisa nacionais e internacionais, observa-se o uso de ferramentas de inteligência computacional, como redes neurais artificiais (RNA) (RAZA, MOKHLIS, *et al.*, 2016); lógica Fuzzy/Fuzzy adaptativa (MAHELA e SHAIK, 2019); árvore de decisão (ALMALKI e HATZIADONIU, 2018); transformada de Fourier (TF) (XU e ZHAO, 2011); transformada S (HUDA, ABDULLAH e JOPRI, 2013; PUJANTARA, PRIYADI, *et al.*, 2016) e outros. A maioria desses métodos necessita de uma grande quantidade de amostras de treinamento a fim de que se incorpore à rede ou ao algoritmo o conhecimento necessário para classificação correta dos fenômenos e, conseqüentemente, requerem uma elevada capacidade computacional. Na tentativa de contornar esta limitação, alguns algoritmos classificam atributos associados ao sinal, como por exemplo a energia, reduzindo assim a demanda computacional.

Neste contexto, a transformada *wavelet* discreta (TWD) é vista como uma ferramenta capaz de realizar essa classificação automática de faltas em SD (XIANGXUN, 2002; DEVARAJ, RADHIKA, *et al.*, 2006; CÉSAR, VALDOMIRO e GABRIEL, 2006; ALSHAHRANI, ABBOD e ALAMRI, 2015; BÍSCARO, PEREIRA, *et al.*, 2016). A TWD usa janelas com comprimentos diferentes de acordo com a faixa de frequências do sinal e, por meio da análise multirresolução (AMR), decompõe um sinal em diferentes níveis de resolução *wavelet*. Com isso, essa metodologia poderá aprimorar o funcionamento do SD, a partir da melhoria de requisitos básicos como: seletividade, sensibilidade e operação dos religadores (FILHO e MAMEDE, 2000).

Com vistas à evolução que as técnicas supramencionadas têm potencial de agregar aos SD, foi desenvolvido o projeto de pesquisa e desenvolvimento “Novos Elementos de Automação de Rede, com Funções Avançadas de Inteligência Distribuída”, financiado pela EDP Brasil e gerido pelo INESC P&D Brasil, no ambiente de Pesquisa e Desenvolvimento da ANEEL (contrato PD-00380-0027/2018). Dentre os objetivos deste projeto está o desenvolvimento de algoritmos de classificação e detecção de distúrbios nos SD, desenvolvidos nesta dissertação.

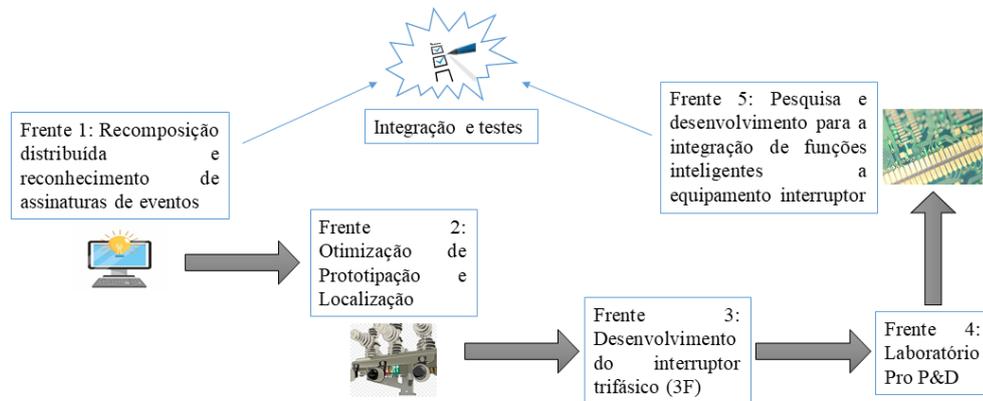
Esses algoritmos, por sua vez, farão parte de um *hardware* embarcado de alto desempenho projetado para incluir as funções de reconhecimento de eventos transitórios. As etapas posteriores do projeto de P&D, como agentes de inteligência, *hardware* e *software*, foram desenvolvidos multi-institucionalmente com o intuito de entregar, ao final do projeto, um equipamento (protótipo) de manobra e proteção de rede elétrica. A parcela do projeto relativa ao desenvolvimento da eletrônica embarcada e inserção dos algoritmos desenvolvidos nos demais módulos do projeto foi realizada pela Universidade Federal do Pará (UFPA). Os algoritmos que permitem a identificação de eventos no SD, a avaliação de possibilidades de religamentos seletivos, as reconfigurações de redes e a proposição de ações em tempo real, foram desenvolvidos pela Universidade Federal de Sergipe (UFS).

Outras universidades participantes da Rede INESC Brasil também participaram do projeto, como a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) responsável pelo módulo de desenvolvimento de agentes inteligentes e recomposição do sistema; a Universidade Federal do ABC (UFABC), responsável pelo desenvolvimento de técnicas para alocação ótima dos equipamentos; a Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), responsável pelo módulo de telecomunicações; Universidade Federal do Vale do São Francisco (UNIVASF) e Universidade Santa Cecília (UNISANTA), que tiveram atuação na gestão e integração do projeto.

Na Figura 2, as frentes, organizadas em um ou mais módulos, do projeto P&D são observadas. Metodologicamente, a identificação de assinaturas de eventos no SD, por meio dos algoritmos inteligentes, está inserida na Frente 1, enquanto o *hardware* embarcado, por exemplo, está inserido na Frente 5. Os equipamentos em desenvolvimento no âmbito do P&D – Frentes 2, 3 e 4 (Figura 2) – têm como característica serem instalados ao potencial, ou seja, não possuem referência de terra, o que vem sendo tendência no desenvolvimento de equipamentos para SD (EATON, 2013; COOPER POWER SYSTEMS, 2014; COOPER POWER SERIES, 2016). Como consequência, no contexto do projeto, são necessários

algoritmos que sejam capazes de identificar e/ou classificar fenômenos no SD sem considerar disponível a medição da tensão, ou seja, devem basear-se somente nos sinais de corrente;

Figura 2 – Gráficos com o histórico dos indicadores DEC e FEC.



Assim, caracterizada a demanda, propõe-se neste trabalho uma abordagem na qual a TWD e outras técnicas são usadas para detectar DQE e classificar faltas a partir exclusivamente das formas de onda de corrente.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO PRINCIPAL

O objetivo geral do trabalho é classificar determinados DQE e faltas em SD, a partir exclusivamente da análise do comportamento de oscilografias de sinais de corrente.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

São objetivos específicos deste trabalho:

- i. Construção de uma base de dados composta por DQE e faltas no SEP no *Alternative Transient Program (ATP)*;
- ii. Desenvolvimento de algoritmos baseados na TW, na TF e no método dos mínimos quadrados (MMQ) para classificação dos seguintes distúrbios: curto-circuito fase-terra; curto-circuito fase-fase; curto-circuito fase-fase-terra; curto-circuito trifásico; saturação de núcleos magnéticos (corrente de *inrush*); carga

notável; distorção harmônica; desequilíbrio de corrente e; variação de frequência;

- iii. Desenvolvimento de critérios de diferenciação para classificação dos distúrbios do item “iv”.

1.2.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

No seu conjunto, este trabalho contém 5 capítulos, além da Introdução.

No Capítulo 2, cujo título é “Fundamentação Teórica”, os DQE e as faltas no SEP são descritos e são realizados os equacionamentos básicos para entendimento da TF, da TWD e do MMQ, técnicas base empregadas na metodologia proposta. No Capítulo 3, intitulado “Revisão Bibliográfica”, há uma abordagem acerca da evolução dos temas centrais deste trabalho ao longo dos anos, elencando o que existe de mais relevante na literatura até os dias atuais. No Capítulo 4, “Metodologia”, são apresentados os algoritmos de classificação de faltas e detecção/classificação de distúrbios. As simulações, análises de dados e resultados obtidos ao longo da pesquisa são apresentados no Capítulo 5. No Capítulo 6 são apresentadas as considerações finais e as recomendações para a continuidade da pesquisa.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo visa contribuir com o entendimento dos principais DQE, bem como faltas no SEP, a partir da apresentação de algumas definições e consequências de suas ocorrências. Além disso, serão apresentados os fundamentos da TW e outras técnicas, tais como TF e MMQ também serão caracterizadas.

2.1 DISTÚRBIOS DE QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA

Entre muitas pesquisas encontradas na literatura, é possível definir o termo qualidade da energia (QE) como qualquer problema manifestado na tensão, corrente ou desvio de frequência, que resulte em falha ou má operação dos equipamentos dos consumidores (DUGAN, MCGRANAGHAN e BEATY, 1996). No Módulo 8 do PRODIST (ANEEL, 2017), todos os procedimentos relativos à QE abordam a qualidade do produto e do serviço prestado, bem como, a qualidade do tratamento de reclamações. Por isso, em seu sentido amplo, o termo QE, é interpretado dentro do contexto da qualidade do serviço prestado pelas concessionárias.

De acordo ainda com o PRODIST (ANEEL, 2017) existem tipos diversos de DQE, que são divididos, na maioria das vezes, em categorias que abrangem duração, conteúdo espectral e amplitude típica do sinal.

Segundo o Módulo 8 do PRODIST, esta classificação dos distúrbios da qualidade do produto é realizada em regime permanente ou transitório:

- i. Permanente:
 - a. Tensão em regime permanente;
 - b. Fator de potência;
 - c. Harmônicos;
 - d. Desequilíbrio de tensão;

- e. Flutuação de tensão;
- f. Variação de frequência.
- ii. Transitório:
 - a. Variações de tensão de curta duração.

Há, portanto, sete diferentes categorias nas quais é possível enquadrar os DQE: fenômenos elétricos transitórios (transitórios impulsivos e oscilatórios); variações de tensão de curta duração (afundamento de tensão, elevação de tensão e interrupção); variações de tensão de longa duração (subtensões sustentadas, sobretensões sustentadas e interrupções sustentadas); desequilíbrios de tensão; distorções da forma de onda (nível CC, harmônicos, inter-harmônicos, *notching* e ruídos); flutuações ou oscilações na forma de onda de tensão e/ou corrente e variações da frequência do SEP.

Apresenta-se a seguir uma breve descrição dos distúrbios, abordados neste trabalho.

2.1.1 DISTORÇÃO HARMÔNICA TOTAL

Uma distorção da forma de onda é definida como um desvio na frequência fundamental – em regime permanente – da forma de onda puramente senoidal, sendo caracterizada principalmente pelo seu conteúdo espectral (OLIVEIRA, 2000).

De acordo com Phipps *et al.*, (PHIPPS, NELSON e SEN, 1994), essa distorção é dita harmônica quando a deformação é equivalente em cada ciclo da frequência fundamental, o que resulta em um espectro composto somente por frequências múltiplas inteiras da fundamental. Esse tipo de deformação tem origem nas cargas e equipamentos, instalados no SEP, com características predominantemente não lineares, como é o caso dos transformadores e motores, cujos núcleos ferromagnéticos estão sujeitos a saturação.

Para quantificar o grau de distorção na tensão e/ou corrente, uma ferramenta matemática conhecida como série de Fourier é utilizada. Essa ferramenta torna possível a análise individual de cada componente harmônica e, conseqüentemente, a obtenção do conteúdo espectral de um sinal periódico. Com isso, a distorção final pode ser determinada por uma superposição de várias componentes do sinal distorcido.

Para analisar os níveis de deformação nas formas de onda fundamental de tensão e corrente, a distorção harmônica total (DHT) é utilizada como um dos principais indicadores de distorção harmônica (AKAGI, 1996). As Equações (1) e (2) são usadas para expressar tais definições (ANEEL, 2017):

$$DHT_v = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} V_h^2}}{V_1}, \quad (1)$$

$$DHT_i = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} I_h^2}}{I_1}, \quad (2)$$

em que, DHT_v representa a distorção harmônica total de tensão [%]; DHT_i a distorção harmônica total de corrente [%]; h a ordem da harmônica (de 2 até h_{max}); V_h o valor RMS da componente da tensão de ordem h [V]; V_1 o valor RMS da componente da tensão fundamental [V]; I_h o valor RMS da componente da corrente de ordem h [A]; I_1 o valor RMS da componente da corrente fundamental [A].

De acordo com o PRODIST os valores de referência de distorções harmônicas de tensão a serem adotados para a manutenção da QE de um SEP estão descritos na Tabela 1. Nessa tabela os limites máximos para o surgimento de harmônicas definidos em resolução específica são apresentados, após um período experimental de coleta de dados em um SD.

Tabela 1 – Valores de referência globais da DHT (em % da tensão fundamental).

Tensão nominal do barramento (V_n)	Distorção harmônica total de tensão que foi superado em apenas 5% das 1008 leituras válidas
$V_n \leq 1,0$ kV	10,00%
$1,0$ kV $< V_n < 69$ kV	8,00%
69 kV $\leq V_n < 230$ kV	5,00%

Fonte: (ANEEL, 2019).

Uma outra recomendação para o limite da DHT foi proposta pelo *Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)* que, obedecendo à norma IEEE Std 519-2014, afirma que a DHT de tensão não pode ser superior a 5% para sistemas com tensão nominal do barramento inferior a 69 kV (IEEE STANDARDS ASSOCIATION, 2014). Ainda segundo o IEEE, a DHT de corrente em SD é limitada em 25% para as harmônicas pares e em até 20% para as harmônicas ímpares dependendo dos valores das correntes de curto-circuito (I_{cc}) e da componente fundamental (I_o).

2.1.2 DESEQUILÍBRIO DE CORRENTE

O desequilíbrio é definido como o desvio máximo da média das correntes ou tensões trifásicas divididas pela média das correntes ou tensões trifásicas, expressado em percentual (ANEEL, 2017). De acordo com (DUGAN, MCGRANAGHAN e BEATY, 1996), desequilíbrios são estimados a partir da relação entre a componente de sequência negativa e a componente de sequência positiva dos sinais referenciados. Assim, um sistema é dito equilibrado quando as componentes de sequência zero e de sequência negativa são nulas. Por outro lado, um sistema é dito desequilibrado (ou assimétrico), quando apresenta simultaneamente duas ou mais componentes de sequência.

De acordo com a (ANEEL, 2017), qualquer diferença verificada nas amplitudes entre as três tensões de fase de um determinado sistema trifásico e/ou na defasagem elétrica de 120° entre as tensões de fase do mesmo sistema pode ser considerado como desequilíbrio de tensão. O mesmo vale para o desequilíbrio de corrente.

Na maioria das vezes esse fenômeno se origina nos SD, devido a uma distribuição inadequada de cargas monofásicas, causando o surgimento de tensões de sequência negativa. O agravamento do problema ocorre quando consumidores, alimentados de forma trifásica, possuem uma má distribuição de cargas em seus circuitos internos, fazendo com que correntes desequilibradas surjam nos circuitos das concessionárias. A queima de fusíveis em uma fase de um banco de capacitores trifásicos também pode ser considerada como uma das causas dos desequilíbrios de tensão e corrente (OLIVEIRA, 2000).

Quando os consumidores se deparam com o desequilíbrio algumas características são observadas, tais como: amplitudes diferentes, assimetria nas fases e assimetria conjunta de amplitudes e fases. As amplitudes diferentes são as características mais evidenciadas no SEP.

Numericamente o fator de desequilíbrio de uma rede elétrica é dado pela Equação (3), sendo válido tanto para as tensões como para as correntes (ANEEL, 2017).

$$\text{Fator de Desequilíbrio} = \frac{|\text{Componente de Sequência Negativa}|}{|\text{Componente de Sequência Positiva}|} \cdot 100\%. \quad (3)$$

O PRODIST determina que o valor de referência para o desequilíbrio de tensão nos barramentos do SD ($1 \text{ kV} < \text{Tensão nominal do barramento } (V_n) < 230 \text{ kV}$) deve ser igual ou inferior a 2%.

As normas nacionais e internacionais, como um todo, não abordam de maneira direta os limites do desequilíbrio de corrente, deixando a critério dos fabricantes de equipamentos a

definição dos seus próprios limites. No entanto, pode ser admitido o valor de 10% como sendo o limite máximo de desequilíbrio de corrente no SEP (MORENO, 2001). Vale ressaltar que em alguns equipamentos este valor pode ser bem menor, afinal, os desequilíbrios estão relacionados ao aumento da temperatura de funcionamento e isto pode levar, em seu estado crítico, a uma falha precoce.

2.1.3 VARIAÇÃO DE FREQUÊNCIA

Variações na frequência são definidas como desvios no valor da frequência fundamental do SEP. A frequência do SEP está diretamente relacionada à velocidade de rotação dos geradores que suprem o sistema. Pequenas variações de frequência são observadas como resultado do balanço dinâmico entre carga e geração no caso de alguma alteração (variações na faixa de $60 \pm 0,5$ Hz). A amplitude da variação e sua duração dependem das características da carga e da resposta do regulador de velocidade da geração (OLIVEIRA, 2000). No caso do Brasil a frequência fundamental é de 60 Hz (DUGAN, MCGRANAGHAN e BEATY, 1996).

Faltas nos sistemas de transmissão, saída de um grande bloco de carga ou saída de operação de uma grande fonte de geração (danos nas palhetas das turbinas, por exemplo) são possíveis causadores da ultrapassagem dos limites estipulados para as variações de frequência durante uma operação normal em regime permanente. Em sistemas isolados, por outro lado, durante a ocorrência de um distúrbio, a magnitude e o tempo de permanência das máquinas operando fora da velocidade, resultam em desvios da frequência em proporções mais significativas.

De acordo com o PRODIST, (ANEEL, 2017), o SD e as instalações de geração conectadas ao mesmo devem – em condições normais de operação e em regime permanente – operar dentro dos limites de frequência situados entre 59,9 Hz e 60,1 Hz. No caso de ocorrência de distúrbios no SD, as instalações de geração devem garantir que a frequência retorne (no intervalo de tempo de 30 segundos após a transgressão) para a faixa de 59,5 Hz a 60,5 Hz, para permitir a recuperação do equilíbrio carga-geração. O módulo ainda traz outros limites estabelecidos para a frequência no caso de necessidade de corte de geração ou da carga para que se permita a recuperação do equilíbrio carga-geração durante a ocorrência de distúrbios na rede. Na Tabela 2 é possível observar essas relações.

Tabela 2 – Relações estabelecidas para variação de frequência.

Varição de frequência	Relação definida	Observação
Critério Geral	$f < 56,5$ ou $f > 66$	Valores não podem ser excedidos
	$f > 63,5$	Pode ser ultrapassado por até 10 s
Critérios de parada de acordo com o tempo de duração da variação de frequência	$f > 62$ ou $f \leq 64,5$	Podem ser ultrapassados por até 30 s
	$f < 57,5$	Podem ser ultrapassados por até 5 s
	$f \geq 57,5$ ou $f < 58,5$	Podem ser ultrapassados por até 10 s

Fonte: (ANEEL, 2017).

2.1.4 CORRENTE DE *INRUSH*

A corrente de *inrush* (CI) é a corrente máxima de entrada instantânea dada por um dispositivo elétrico quando o mesmo é energizado (GONDANE, SHEIKH, *et al.*, 2018). Em geral, essa corrente surge nos enrolamentos de um transformador de potência quando energizado.

Quando o fenômeno de energização ocorre, certa quantidade de fluxo residual permanece no núcleo devido às propriedades do material do núcleo magnético. No entanto, ao realizar o religamento do transformador, o fluxo remanescente (ou residual) permanecerá no equipamento e, para manter as características de tensão e correntes nominais, as densidades de fluxo podem atingir valores altos devido ao acréscimo desse fluxo residual. Esse novo valor de pico conduz o núcleo do equipamento à saturação e, conseqüentemente, ao surgimento de uma corrente inicial maior que a corrente a vazio e até mesmo que a corrente nominal do transformador, sendo chamada de CI.

A CI se estabelece por vários ciclos até dezenas de milissegundos, compreendendo um amplo espectro de harmônicos que inclui componentes de ordem par, predominante de segunda harmônica. São necessários cerca de 30 a 40 ciclos para que a corrente se estabilize em seu valor normal (HARLOW, 2003). Em geral, sua amplitude se aproxima da amplitude da corrente de curto-circuito, assumindo valores entre 10 e 20 vezes da corrente nominal do transformador em seu pico inicial (RAHMAN e JEYASURYA, 1988).

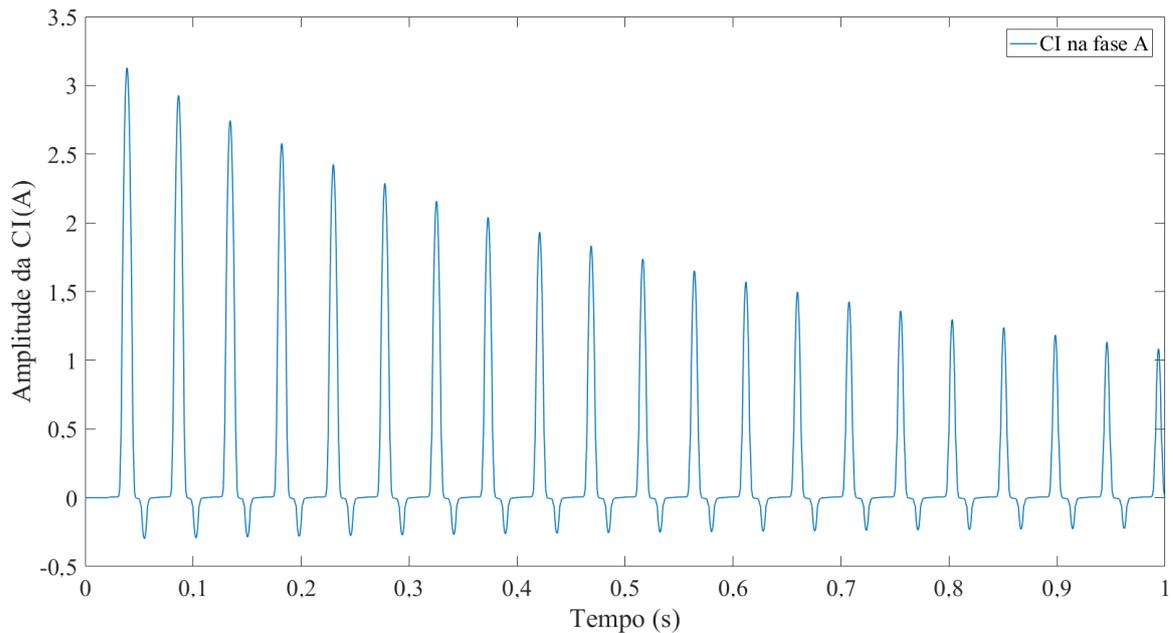
Apesar do processo de energização estar normalmente relacionado ao surgimento da CI de um transformador, com ou sem carga em seu secundário, outras situações, de acordo com (GOPIKA e DEEPA, 2017), proporcionam o aparecimento desta corrente. Essas situações são:

- Paralelismo de um transformador já energizado com outro na mesma situação;
- Evolução de faltas no sistema durante um processo de contingência (como falta fase-terra para falta fase-fase-terra);

- Ocorrência de falta externa;
- Ocorrência, após a eliminação de uma falta externa, de uma tensão de restabelecimento.

Na Figura 3 a forma de onda típica dos primeiros picos para a CI é apresentada. Ela foi obtida a partir de simulações no *software* ATP, conforme será descrito no Capítulo 4.

Figura 3 – Forma de onda típica da CI.



Fonte: autoria própria.

Analisando Figura 3, a forma de onda da corrente é completamente deslocada nos primeiros ciclos. Apesar de remeter a uma onda senoidal, boa parte dos semiciclos alternados (negativos) são eliminados. Isso ocorre, pois, a densidade do fluxo magnético é inferior ao valor de saturação para os primeiros semiciclos, tornando a CI altamente assimétrica. O decaimento dessa forma de onda reflete a condição de amortecimento causada pelas perdas ocorridas durante o processo de energização.

Além da fadiga mecânica causada nos enrolamentos dos transformadores de potência pelo aparecimento da CI, outros efeitos resultam desse fenômeno, tais como (HUDSON, 1966):

- Atuação indevida de relés e fusíveis de proteção localizados próximos ao transformador;
- Deterioração de isolamento;

- Afundamentos temporários de tensão, com danos a QE (devido à interrupção de processos produtivos);
- Demanda de natureza eletromecânica e térmica no transformador e nos demais dispositivos do SEP, o que incorre em redução de vida útil;
- Sobretensões causadas por fenômenos de ressonância harmônica em sistemas que contêm filtros elétricos (sistemas industriais e linhas de transmissão em corrente contínua).

2.2 FALTAS

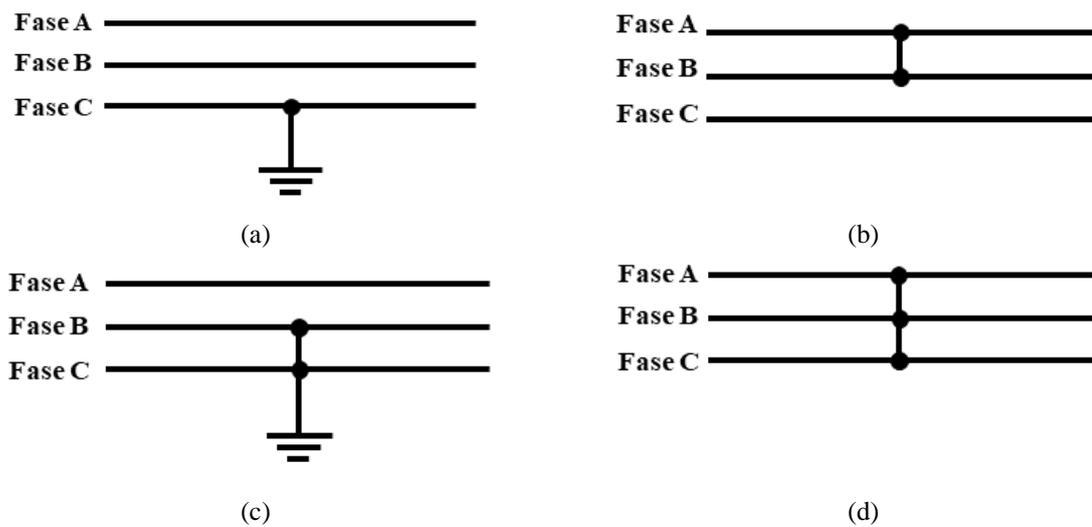
O termo “falta” é utilizado para descrever todo fenômeno acidental que, de alguma forma, atrapalha o funcionamento normal dos equipamentos presentes no SEP (STEVENSON, 1982). As faltas podem ser do tipo transitórias ou permanentes.

Faltas do tipo permanentes são irreversíveis, necessitando de intervenção do homem para sua correção. Em geral, quando uma falta desse tipo ocorre o restabelecimento do fornecimento de energia é realizado somente depois de efetuar os devidos reparos na rede. Por outro lado, uma falta transitória afeta o circuito apenas temporariamente. Após a operação dos equipamentos de proteção, o religamento do circuito ocorre sem causar danos físicos ao SEP, afinal, nesse momento a falta já foi eliminada. Normalmente o que ocorre é a evolução de uma falta transitória para permanente (KINDERMANN, 1997).

De acordo com (KINDERMANN, 1999) e observando a Figura 4, as faltas no SEP são classificadas, em ordem decrescente de frequência de ocorrência, nos tipos fase-terra, fase-fase, fase-fase-terra e trifásica. Um curto-circuito é dito franco (ou metálico) quando não existe a resistência de falta entre a fase e a terra.

O curto-circuito fase-terra é o curto que ocorre entre uma das fases e a terra, conforme Figura 4 (a). Já o curto-circuito fase-fase é o curto que ocorre entre duas das fases. Tratando-se de um curto-circuito assimétrico sabe-se que o circuito trifásico está desequilibrado. Na Figura 4 (b) a ocorrência de um curto fase-fase AB é verificada. Um curto-circuito é dito fase-fase-terra quando ocorre entre duas fases e a terra. Na Figura 4 (c), um curto-circuito fase-fase-terra BC é observado. Ademais, o curto-circuito trifásico, descrito na Figura 4 (d), é o curto que ocorre entre as três fases com menor frequência no SEP.

Figura 4 – Tipos de falta: (a) curto-circuito fase-terra; (b) curto-circuito fase-fase; (c) curto-circuito fase-fase-terra; (d) curto-circuito trifásico.



Fonte: autoria própria.

Uma falta do tipo curto-circuito causa danos consideráveis aos componentes que interligam o sistema. De acordo com (STEVENSON, 1982), quando há um contato entre condutores submetidos a potenciais diferentes há uma falta do tipo curto-circuito. Esse contato pode ser direto (franco ou através de impedância) ou indireto (através de arco voltaico).

Em (KINDERMANN, 1999), as faltas na rede elétrica ocorrem devido a:

- Problemas de isolamento, nos quais as tensões nos condutores do sistema são elevadas e, conseqüentemente, rupturas para a terra ou entre cabos ocorrem por diversos motivos. A temperatura, umidade e corrosão caracterizam esse tipo de problema;
- Problemas mecânicos, oriundos da natureza, isto é, contato acidental entre condutores através de agentes externos, tais como: ação do vento, neve, contaminação, galhos de árvores e entre outros;
- Problemas elétricos intrínsecos da natureza ou devido à operação do sistema. Como exemplo temos as descargas atmosféricas diretas ou indiretas, surtos de chaveamento e sobretensões do sistema;
- Problemas de natureza térmica que geram o aquecimento de cabos e equipamentos do SEP, além de diminuir a vida útil de ambos. Esse aquecimento decorre de sobrecorrentes resultantes da sobrecarga do sistema ou sobretensões dinâmicas do sistema;

- Problemas de manutenção e inspeção dos equipamentos. A substituição inadequada de peças, pessoal não treinado e qualificado, peças de reposição não adequadas, falta de controle de qualidade durante a compra do material e inspeção na rede não apropriada são alguns exemplos. Todos possuem o fator humano envolvido;
- Problemas de outras categorias, tais como: queimadas, atos de vandalismo, inundações, desmoronamentos e demais acidentes de qualquer natureza.

Durante a ocorrência do curto-circuito algumas propriedades são encontradas com maior frequência, tais como: a ocorrência de sobrecorrente ou subtensão em uma ou mais fases afetadas pelo curto-circuito, o valor considerável de corrente de sequência negativa (exceto para o tipo de curto-circuito trifásico) e o valor considerável de corrente de sequência zero no instante em que ocorre o curto-circuito envolvendo a terra (STEVENSON, 1982).

2.3 CARGA NOTÁVEL

O SD não opera, em condição normal, com 100% de sua capacidade, no entanto, ele deve absorver, quando de contingência, a sua carga total, afinal, todos os SD são projetados para atender a um valor máximo. Porém, considerando que o regime das cargas existentes não é fixo (varia de um valor mínimo a um valor máximo), é pouco provável que o aumento da carga em um sistema real ocorra simultaneamente e, por isso, uma diversidade de consumo é considerada para cada um dos níveis de carga, evitando um superdimensionamento do sistema.

Em geral, a carga notável não é considerada uma falta no SEP, afinal, esse fenômeno resulta da conexão de cargas ou equipamentos de grande porte nos SD. No entanto, manobras de energização provocam o aparecimento de transitórios eletromagnéticos, tais como sobrecorrentes temporárias. Assim, o conhecimento do impacto destas entradas de cargas no SEP pode auxiliar na filosofia de proteção, evitando que as sobrecorrentes venham a ser interpretadas como faltas e resultem na interrupção indevida do fornecimento de energia.

2.4 MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS

O método dos mínimos quadrados (MMQ) é uma técnica matemática que minimiza a soma dos quadrados dos erros obtidos durante a aproximação. O MMQ é capaz de estimar

fasores com boa precisão, encontrando o melhor ajuste para um determinado conjunto de dados durante a fase de geração do sinal de referência e minimizando a soma dos quadrados das diferenças entre o valor estimado e os dados observados (ASTROM e WITTENMARK, 1990). Um número finito de dados amostrais é utilizado durante o ajuste, o que torna possível a determinação da curva que descreva melhor o comportamento do ensaio em questão.

O MMQ determina os parâmetros desconhecidos de um modelo, de forma que a soma dos quadrados das diferenças entre os valores verdadeiros e os que são estimados seja mínima (ASTROM e WITTENMARK, 1990; MURUGAVEL, RANGANATHAN, *et al.*, 2002).

Para obter uma solução analítica, os valores reais devem ser uma função linear dos parâmetros desconhecidos. Assim, a seguinte equação é considerada:

$$\hat{y} = \theta_1 \varphi_1(x) + \theta_2 \varphi_2(x) + \dots + \theta_n \varphi_n(x), \quad (4)$$

em que $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n$ são funções conhecidas, $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$ são os parâmetros desconhecidos e \hat{y} a função de aproximação. Os pares de observação $\{(x_i, y_i), i = 1, 2, \dots, N\}$ são obtidos através de um experimento. Um dos maiores problemas para determinar os parâmetros desconhecidos é que os valores de y e \hat{y} devem ser o mais próximo possível.

Partindo do pressuposto de que todas as medições possuem a mesma precisão, o princípio do MMQ afirma que os parâmetros devem ser estimados de maneira que se obtenha uma função erro mínima. Essa função é mostrada na Equação (5):

$$J(\theta) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \epsilon_i^2, \quad (5)$$

em que, $\epsilon_i = y_i - \hat{y}_i = y_i - \theta_1 \varphi_1(x) + \theta_2 \varphi_2(x) + \dots + \theta_n \varphi_n(x), i = 1, 2, \dots, N$.

Para simplificar os cálculos, as Equações (6), (7), (8) e (9) são definidas:

$$\varphi = [\varphi_1 \ \varphi_2 \ \dots \ \varphi_n]^T, \quad (6)$$

$$\theta = [\theta_1 \ \theta_2 \ \dots \ \theta_n]^T, \quad (7)$$

$$y = [y_1 \ y_2 \ \dots \ y_n]^T, \quad (8)$$

$$\phi = \begin{bmatrix} \varphi^T(x_1) \\ \vdots \\ \varphi^T(x_2) \end{bmatrix}. \quad (9)$$

A partir dessas definições, a Equação (10) é obtida:

$$\hat{y} = \phi \cdot \theta, \quad (10)$$

com isso, a função erro, Equação (5), é mínima. Isto ocorre para os parâmetros θ quando a Equação (11) é aplicada:

$$\phi^T \cdot \phi \cdot \theta = \phi^T \cdot y. \quad (11)$$

Para determinar os parâmetros θ , a Equação (12) é obtida a fim de modelar o estimador MMQ:

$$\theta = (\phi^T \cdot \phi)^{-1} \cdot \phi^T \cdot y. \quad (12)$$

Uma das maiores vantagens deste método é que, na maioria dos casos, uma solução capaz de proporcionar erro mínimo em sistemas que são indeterminados é obtida.

2.5 TRANSFORMADA DE FOURIER

A transformada de Fourier (TF) é uma ferramenta matemática capaz de representar um sinal por meio da soma ponderada de funções senoidais complexas. Ao submeter um sinal à TF, os resultados serão obtidos em termos de parcelas correspondentes a cada componente de frequência pertencente àquele sinal de entrada (POLIKAR, 1996).

Na Equação (13) a TF de um sinal contínuo $f(t)$ é apresentada (LIM, BACE, *et al.*, 1987). Essa transformada se baseia na integração de todo o sinal para cálculo da função que representa seu espectro de frequência ($F(u)$):

$$F(u) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-i2\pi ut} dt, \quad (13)$$

em que $e^{-i2\pi ut}$ ($i = \sqrt{-1}$) é a base da TF, sendo $u = \frac{k}{N}$, ($k = 0, 1, \dots, N - 1$). Como resultado da aplicação da TF em um sinal, um conjunto de N coeficientes é obtido, indexados por k (chamado de índice de frequência).

Com a aplicação da TF não é possível analisar separadamente diferentes trechos do sinal. Assim, caso um trecho contenha ruídos ou pontos anômalos, o processamento de todo o sinal é comprometido. Por esse motivo, o conceito de uma transformada de Fourier janelada (TFJ), que analisa a frequência do sinal localmente no tempo, foi introduzido em (GABOR, 1946).

A TFJ divide um sinal em regiões para que se aplique a TF em cada uma delas. Em suma, uma janela de observação no domínio do tempo é deslocada e a TF é calculada para cada posição da janela, mapeando o sinal original em uma função bidimensional de tempo e frequência. Matematicamente, a TFJ de um sinal $f(t)$ – considerando $j(t)$ a função que cumpre o papel do janelamento e b o tamanho da janela – é dada por:

$$F(u, b) = \int_{-\infty}^{\infty} j(t - b)f(t)e^{-i2\pi ut} dt. \quad (14)$$

A precisão da TFJ é determinada pelo tamanho da janela e, tendo em vista que seu tamanho permanece constante para todas as frequências, alguns sinais podem não se ajustar nesta análise (GABOR, 1946).

Por fim, com a transformada discreta de Fourier (TDF) há uma aproximação para os respectivos coeficientes da série de Fourier. A TDF representa uma sequência x_m e pode ser definida como (LIM, BACE, *et al.*, 1987):

$$\bar{X}_\alpha = \sum_{m=0}^{N-1} x_m W^{m\alpha}, \quad k = 0, 1, \dots, N - 1, \quad (15)$$

em que $W = e^{-i\frac{2\pi}{N}}$ ($i = \sqrt{-1}$), x_m é o sinal discreto com $(N - 1)$ amostras e \bar{X}_α é o sinal discreto transformado com $\alpha = 0, \dots, N - 1$. Para que um algoritmo realize a TDF de um sinal de N amostras, um esforço computacional de N^2 é necessário.

A TDF possui uma propriedade de inversão que remove a assimetria entre a sequência original de comprimento N e a sequência de comprimento infinito. Graças a essa propriedade não há duas sequências distintas com a mesma TDF. Linearidade e periodicidade também são propriedades básicas da TDF.

2.6 TRANSFORMADA *WAVELET*

A ideia básica da utilização da Transformada *Wavelet* (TW) é a análise de dados de acordo com escalas variáveis no domínio do tempo e da frequência. A TW representa uma técnica de janelamento variável responsável por realizar uma operação linear que mapeia um sinal de seu domínio original para um domínio tempo-frequência, decompondo um sinal em conjuntos apropriados de bases de funções (MISITI, MISITI, *et al.*, 2013).

O conceito de uma *wavelet*, em (BÍSCARO, PEREIRA, *et al.*, 2016), é dado por uma pequena onda capaz de decompor, descrever ou representar outra função após uma oscilação. Existem infinitas *wavelet* usadas tanto para análise contínua quanto para análise discreta dos sinais. As famílias de *wavelet* mais conhecidas são: *wavelet* Haar, Daubechies, Symlets, Coiflets, Biorthogonais, Biorthogonais reversas, Meyer, Gaussianas, Chapéu Mexicano, Morlet, Gaussianas complexas, Shannon, dentre outras. A escolha da *wavelet* mais adequada sempre é determinada de acordo com as características do sinal, assim como, pela natureza da aplicação. De acordo com (MISITI, MISITI, *et al.*, 2013), a partir de um conhecimento prévio das propriedades de análise e de síntese das *wavelet* é possível escolher a mais adequada para uma aplicação específica.

O conceito da TW foi introduzido com o intuito de sanar às limitações da TF, afinal, para séries temporais não estacionárias a TF não é considerada uma transformada eficiente. Enquanto a TF é realizada sob um sinal visto como um todo (o que acarreta em uma representação paupérrima para sinais que contêm descontinuidades e variações bruscas), a TW se ajusta automaticamente ao tamanho da janela a fim de fornecer uma boa resolução de tempo e nas baixas e altas frequências, o que permite a extração de cada componente do sinal com uma resolução adequada à sua escala.

Em suma, a TW e a análise de Fourier tratam da decomposição de funções em termos de um conjunto de funções básicas. No entanto, a TW decompõe funções não em termos de polinômios trigonométricos, mas em termos de *wavelet*, que são geradas na forma de translações e dilatações de uma função fixa chamada *wavelet* -mãe.

Conforme será observado, é necessário distinguir duas versões diferentes da TW. Em primeiro lugar, a transformada contínua *wavelet* (TWC), em que se obtém a superfície dos coeficientes *wavelet*, para diferentes valores de fatores de escala e de translação, a partir do mapeamento de uma função de uma variável contínua em uma função de duas variáveis contínuas. Em segundo lugar, a transformada *wavelet* discreta (TWD), que é usada para

decompor um sinal digitalizado em diferentes níveis de resolução a partir do mapeamento de uma sequência de números em outra (DEOKAR e WAGHMARE, 2014).

Neste contexto, essa seção apresenta um breve resumo sobre a teoria básica da TW.

2.6.1 FUNÇÕES WAVELET

De acordo com (ZANG e ZHAO, 2009), uma *wavelet*-mãe é uma função que oscila, possui energia finita e valor médio zero. Dessa forma, quando uma *wavelet* torna-se base para determinar outras, esta pode ser denominada *wavelet* -mãe.

De forma geral, a *wavelet* -mãe $\psi_{a,b}$ é definida pela seguinte expressão (BÍSCARO, PEREIRA, *et al.*, 2016):

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad a, b \in \mathbb{R}, a \neq 0, \quad (16)$$

na qual a variável t pode corresponder a tempo ou espaço geradas a partir de a e b ; a representa o parâmetro de dilatação e b é o parâmetro de translação da mesma função $\psi_{a,b}$. Dilatação mede o grau de compressão e escala, isto é, “comprimir” e “esticar” a *wavelet*, já o parâmetro translação determina a localização da *wavelet* no tempo, ou seja, “deslocar” a *wavelet* no eixo das abcissas. O pré-multiplicador $1/\sqrt{|a|}$ é um fator de normalização da energia da *wavelet*, garantindo sua independência dos fatores a e b .

Segundo (BÍSCARO, PEREIRA, *et al.*, 2016) e de acordo com a Equação (16), se observarmos a condição $|a| > 1$, concluímos que a função $\psi_{a,b}(t)$ tem um maior espaço no tempo (seria uma versão dilatada), correspondendo às frequências mais baixas. Já para a condição $|a| < 1$, temos uma situação inversa à apresentada, já que a *wavelet* está contraída (seria uma versão comprimida), correspondendo às altas frequências. Quanto ao parâmetro b , observamos que ele proporciona a varredura do sinal a ser analisado, o que propicia análises dos sinais no tempo e na frequência. Através desses parâmetros de translações e dilatações da *wavelet* -mãe é possível obter outras *wavelet*, as quais são conhecidas como *wavelet*-filhas, que constituem uma família de curvas.

Para que uma função seja denominada *wavelet* (definida pela letra *psi* ψ) ela deve apresentar um comportamento oscilatório e de curta duração. Além disso, algumas condições matemáticas devem ser atendidas. Essas condições, segundo (HUANG, YANG e HUANG, 2002), são:

- i. A integral dessa função deve ser zero, isto é:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) dt = 0. \quad (17)$$

Essa condição é conhecida como condição de admissibilidade³, a partir da qual se obtém a transformada inversa da função *wavelet*.

- ii. A função *wavelet* deve possuir energia limitada, ou seja:

$$\int_{-\infty}^{\infty} |\psi(t)|^2 dt < \infty. \quad (18)$$

Apesar de que na prática as funções *wavelet* são normalizadas para que sua energia seja unitária, elas possuirão quaisquer valores de energia, desde que seja finita e preservada pela análise. Com essa propriedade a função *wavelet* possui suporte compacto, ou com um decaimento rápido de amplitude, garantindo a localização temporal.

2.6.2 A TRANSFORMADA WAVELET CONTÍNUA

A TWC é vista como uma correlação cruzada do sinal com um conjunto de *wavelet* com as mais variadas larguras transladadas ao longo do sinal. A TWC de um sinal contínuo $x(t)$ com respeito a *wavelet*-mãe $\psi(t)$ é definida por (ADDISON, 1989):

$$CWT(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt, \quad (19)$$

em que a é a dilatação ou fator de escala e b é o fator de translação, e ambas as variáveis são contínuas, e $*$ sinaliza o conjugado da função *wavelet* utilizada. O fator de escala e o tamanho da janela são interdependentes, ou seja, as menores escalas implicam nas menores janelas.

2.6.3 A TRANSFORMADA WAVELET DISCRETA

Anteriormente a função *wavelet* foi definida continuamente em relação aos parâmetros de escala e dilatação de um sinal. Em sistemas reais a TWC é limitada e, por isso, a discretização da TW é necessária. A TWD é definida como (MALLAT, 1989):

³ Definida como: $C_\psi = 2\pi \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\hat{\psi}(u)|^2}{|u|} du < \infty$, em que $\hat{\psi}(u)$ é a FT de $\psi(t)$. Se $\hat{\psi}$ é uma função contínua, então C_ψ pode ser finito somente se $\hat{\psi}(0) = 0$, ou seja, $\int_{-\infty}^{\infty} \hat{\psi}(t) dt = 0$, o que corresponde ao seu valor médio no domínio temporal (COSTA, SOUZA e BRITO, 2010).

$$DWT(m, k) = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \sum_n x(n) \cdot \psi\left(\frac{k - n \cdot b_0 a_0^m}{a_0^m}\right), \quad (20)$$

em que $\psi(\cdot)$ é a *wavelet*-mãe e a (escala) e b (translação) são funções de um parâmetro inteiro m , isto é, $a = a_0^m$ e $b = nb_0 a_0^m$ para que a discretização de parâmetros seja possível. Isso permite a expansão da família originada pela *wavelet*-mãe e gera as chamadas *wavelet*-filhas. Nesta equação, a variável inteira k se refere a um número particular de amostras de um determinado sinal de entrada.

Uma maneira eficiente de se aplicar essa transformada é a partir de filtros, conforme desenvolvido em (MALLAT, 1989), na qual a decomposição da *wavelet* é realizada com a análise em multirresolução (AMR).

2.6.4 ANÁLISE MULTIRRESOLUÇÃO

A AMR, também conhecida como algoritmo de Mallat, é um método utilizado para implementação da TWD. Filtrar um sinal significa suavizar determinadas frequências ou uma banda de frequência. No contexto de processamento de sinais isso é caracterizado pela convolução do sinal para a resposta impulso do filtro ou, simplesmente, convolução. Sendo assim, uma AMR é entendida como um conjunto de convoluções entre coeficientes *wavelet* e os coeficientes dos filtros. Como foi tratado em (KAMTHEKAR, MUNJE e KUSHARE, 2017), a operação de convolução é dada por:

$$y[n] = u[k] * h[n - k] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} u[k]h[n - k]. \quad (21)$$

Em uma análise *wavelet*, o processo AMR baseia-se na filtragem de um sinal a ser analisado através de filtros passa alta, $h[n]$, que fornece versões do sinal original relativas aos coeficientes de funções *wavelet*, e passa baixa, $g[n]$, que fornece as versões do sinal a partir das funções escala, dada por: $\varphi_{j,k}(t) = 2^{\frac{j}{2}}\varphi(2^j t - k)$. As características desses filtros dependem da *wavelet*-mãe escolhida. Na prática, através do filtro passa alta obtém-se o que chamamos de coeficiente de detalhe e a partir do filtro passa baixa os coeficientes de aproximação são produzidos. As aproximações se referem as altas escalas, ou seja, as componentes de baixa frequência do sinal e os detalhes abrangem as baixas escalas que correspondem as componentes de alta frequência.

O equacionamento do algoritmo de recursão envolvendo os filtros é descrito em (KAMTHEKAR, MUNJE e KUSHARE, 2017), sendo assim:

$$c_j[k] = \sum_{m=-\infty}^{\infty} C_{j-1}[m]g[m - 2k], \quad (22)$$

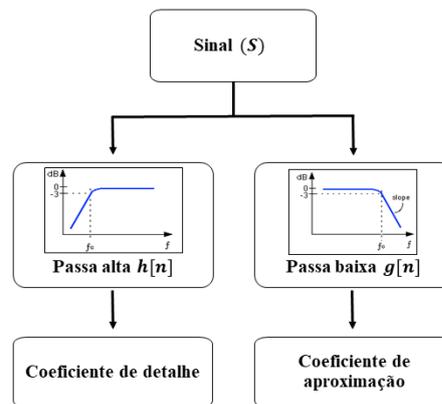
$$d_j[k] = \sum_{m=-\infty}^{\infty} C_{j-1}[m]h[m - 2k], \quad (23)$$

em que, $j = 1$, quando $C_0[m]$.

Na Equação (22), o coeficiente de filtro c_i refere-se ao coeficiente *wavelet* de aproximação. Já na Equação (23), o parâmetro d_i está associado ao coeficiente de detalhe.

O processo de decomposição *wavelet* por meio de filtros é apresentado na Figura 5, considerando-se apenas o primeiro nível de filtragem.

Figura 5 – Processo de filtragem de um sinal no primeiro nível.

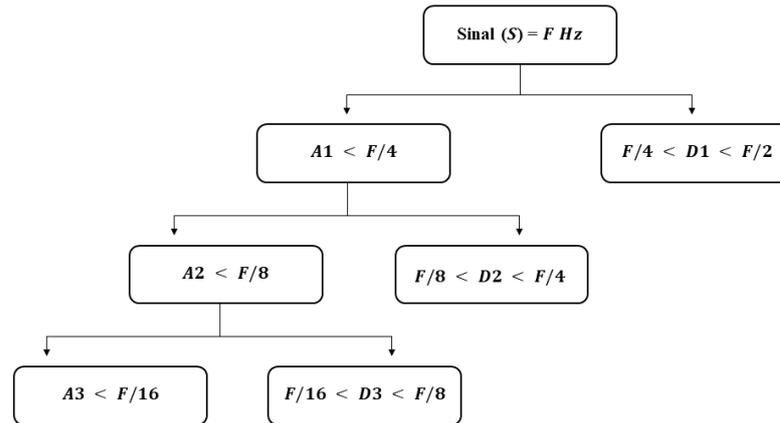


Fonte: autoria própria.

Os filtros utilizados na AMR suavizam e reamostram o sinal. Durante o processo de reamostragem, ou *downsample*, a taxa de amostragem original do sinal diminui, eliminando os pontos intercalados.

De maneira prática, o processo de decomposição pode ser iterativo, com decomposições sucessivas de aproximações, de modo que um sinal é dividido em outras componentes de menor resolução, como será observado na Figura 6.

Figura 6 – Processo sucessivo de decomposição de um sinal S em AMR.



Fonte: autoria própria.

Em suma, a ideia básica ilustrada na Figura 6 é dividir o espectro do sinal S em sub-bandas de frequência e então tratar individualmente cada uma das componentes de resolução menor. O sinal S é analisado em termos de bancos de filtros passa baixa, aproximações (A_1 , A_2 e A_3), e passa alta, detalhes (D_1 , D_2 e D_3). Segundo Mallat, em (MALLAT, 1989), se o sinal original é amostrado em F Hz, a maior frequência possível de D_1 , segundo o teorema de Nyquist, seria $F/2$ Hz. Com isso, é possível verificar que a faixa de frequências entre $F/4$ Hz e $F/2$ Hz é capturada pelo detalhe D_1 e a faixa de frequências entre $F/8$ Hz e $F/4$ Hz é capturada em D_2 e assim sucessivamente.

O número máximo de níveis de decomposição baseia-se na natureza do sinal, sendo determinado pelo comprimento do sinal, pela *wavelet*-mãe selecionada e pelo nível de detalhe exigido.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo um panorama dos principais trabalhos propostos na área monitoramento de DQE e faltas no SEP que se basearam na teoria *wavelet* será apresentado. O levantamento bibliográfico realizado evidenciou algumas pesquisas relevantes sobre a perspectiva deste trabalho e foi continuamente revisado e ampliado durante o desenvolvimento das atividades propostas. Uma análise bibliográfica dos trabalhos mais relevantes também foi realizada.

3.1 TÉCNICAS DE MONITORAMENTO DE DQE E FALTAS NO SEP

Novas técnicas de monitoramento que buscaram um diagnóstico preciso de DQE e de faltas no SEP são repetidamente discutidas entre pesquisadores e engenheiros de potência. Conseqüentemente, um grande número de propostas de novas metodologias e aperfeiçoamentos de outras já existentes foi observado, visando sempre a otimização da classificação de perturbações.

Xiangxun (2002) desenvolveu uma metodologia baseada em TW para detectar, localizar, quantificar e classificar alguns DQE. A TW aplicada com base no teorema de Vetterli-Herley foi construída. Em termos de detecção e localização determinou-se o instante inicial e a duração do evento. O método de classificação proposto exibiu o vetor de recursos com cinco elementos binários como um código binário e, em seguida, converteu-os em números decimais. A escolha de uma *wavelet* adequada e a extração de recursos exclusivos foram os principais problemas enfrentados pelo pesquisador. Versões suavizadas nas escalas 1, 2 e 3 e a *wavelet* Daubechies 4 (db4) em alguns níveis de decomposição foram calculadas. Os resultados foram corretos e sem ambigüidade.

Posteriormente, Ribeiro *et al.* (2003) propuseram um método de detecção e identificação baseado em uma estimativa anterior do componente fundamental do evento em análise, usando o filtro *notch* adaptativo e o filtro de Kalman para estimativas de frequência, amplitude e fase, nessa ordem. Diferentes técnicas de processamento de sinal foram simuladas para obter um conjunto representativo de parâmetros dos DQE monitorados. A primeira tarefa da estratégia proposta foi a estimação da componente fundamental para gerar um sinal do tipo transitório não estacionário. Desta forma, o filtro de Kalman foi aplicado e empregou-se a TW e a transformada superposta modulada (TSM), para monitoramento de eventos e localização do sinal de frequência em seus níveis de decomposição ou processamento de sinal, respectivamente. Ambas as técnicas revelaram características importantes do sinal do tipo transiente.

No mesmo ano, Saleh *et al.* (2003) propuseram o uso da TWD, em seu segundo nível de decomposição, como ferramenta capaz de detectar e classificar transientes como a CI. Para isso, alguns casos de corrente de operação normal, de CI e de correntes de falta envolvendo a terra foram simulados em laboratório. Esse método não requer uma base de dados grande para treinamento e é adequado para diferenciar a ocorrência da CI dos demais fenômenos. Para diferentes tipos de carregamento e condições de energização o método mostrou-se eficaz, identificando os dados de correntes, incluindo CI, corrente normal e correntes de curto-circuito.

César *et al.* (2006) utilizaram a TWD na detecção e identificação dos DQE. A *wavelet* db4 foi usada como função básica e extraíram-se os coeficientes de detalhe em seu primeiro nível de decomposição. O percentual de sucesso obtido nessa estratégia foi superior a 80% e 90%. Por fim, os DQE foram classificados usando várias técnicas de inteligência artificial: rede neural do tipo *perceptron* de múltiplas camadas (treinado por retropropagação), rede neural de Kohonen (mapa auto-organizável), bayesiana (método estatístico linear) e máquinas de vetores de suporte (MVS). Constatou-se que o classificador *perceptron* apresenta 90% de sucesso para a maioria dos distúrbios descritos no trabalho. A rede neural de Kohonen apresentou uma porcentagem de sucesso de 60%. O classificador MVS é dito como o melhor classificador – 96,29% de precisão. A técnica Bayesiana não foi vista como um bom classificador.

Os autores Devaraj *et al.* (2006) desenvolveram um método usando as propriedades da TWD disponíveis na biblioteca *wavelet Toolbox* do *software* MATLAB, não apenas para detectar problemas de QE, mas também para classificá-los. Em concordância com o algoritmo da RNA foi possível selecionar e extrair informações importantes de um sinal de perturbação e determinar a causa do problema de QE. O cálculo da energia do sinal distorcido, em cada nível de coeficiente *wavelet* foi realizado, sendo que, essa energia baseia-se no teorema de Parseval. Falhas e harmônicos foram injetados no sistema para simular vários tipos de distúrbios.

Borghetti *et al.* (2006) apresentaram uma análise mais detalhada e contínua do espectro de energia de uma falta a partir da TWC. A energia foi usada para detectar frequências individuais que caracterizam os transientes de tensões gerados pela falta. Essas frequências também usar-se-ão para inferir a localização da falta. A alocação de dispositivos de sincronização GPS ao longo dos barramentos da rede permitiu a localização precisa da falta e foi utilizado, no contexto dos sistemas distribuídos de medição, para determinar tanto o tempo de partida do transiente quanto suas formas de onda. Dados como a topologia da rede de distribuição, a velocidade de propagação da onda ao longo das linhas e o tipo de falta foram reconhecidos a partir das frequências detectadas. A família Morlet foi usada neste trabalho.

Um sistema de autotclassificação em tempo real dos DQE, usando a técnica de RNAs *perceptron* multicamada baseada nos coeficientes *wavelet* db4, foi desenvolvido por Kim *et al.* (2006). Neste sistema, a TWD e demais recursos adicionais foram usados para detectar distúrbios de curta e média duração. Esses foram os recursos utilizados: média, desvio padrão, assimetria, curtose, valor médio quadrático, fator de forma, fator de crista e transformada rápida de Fourier (TRF). Cinco tipos de DQE, tais como: tensão normal, *sag*, *swell*, transiente e harmônicos foram simulados. Além disso, o *backpropagation* foi usado como classificador para treinar os pesos da camada oculta da RNA. Uma taxa de sucesso de 95% na classificação de distúrbios foi verificada.

Diego *et al.* (2009) propuseram um algoritmo que mede a distorção harmônica e estima suas características variantes no tempo. Trata-se de um método global para a medição de grupos harmônicos, inter-harmônicos e sub-harmônicos baseado no uso da TW e compatível com a norma IEC Std. 61000-4-7. O quinto nível de decomposição *wavelet* foi estipulado pelos autores, utilizando a *wavelet Packet* do *software* MATLAB para calcular os valores médios quadráticos. Uma etapa de pré-processamento no sinal de entrada antes do cálculo das magnitudes dos grupos inter-harmônicos, usando análise de TDF, foi necessária para filtragem. O método proposto apresentou melhor desempenho que o método IEC para grupos de harmônicos, inter-harmônicos e sub-harmônicos não estacionários e não síncronos no sinal de entrada.

Zang e Zhao, (2009) apresentaram um sistema inteligente que aplicou a TW para extrair características distintas de DQE típicos e usou a MVS para reconhecimento de dados. Os tipos de DQE utilizados para avaliação do método, no *software* MATLAB, incluem distorções harmônicas, quedas de tensão, aumentos de tensão, curtos-circuitos, flutuação de tensão e transientes de tensão. Essa abordagem previu os casos em que o sinal de energia apresenta ruído. Os resultados corroboram para a ideia de que a técnica MVS é facilmente infectada pelo

ruído, por isso a necessidade do uso da TW em uma etapa previamente definida. Os próximos passos do estudo apontam para a necessidade de aplicar a metodologia proposta no monitoramento online.

Um algoritmo de detecção da CI a partir da TW e classificação por RNA do tipo *learning vector quantizer (LVQ*, quantização vetorial de aprendizagem, tradução livre) foi proposto por Mokryani *et al.* (2010). As simulações foram realizadas no *software* ATP, em um sistema-teste IEEE de 14 barras, com diferentes tipos de correntes de partida para os fenômenos de chaveamento de carga, chaveamento de capacitor e faltas monofásicas. Verificou-se que a CI pode ser discriminada de outros transientes simulados. Neste trabalho todas as *wavelet* disponíveis no *wavelet toolbox* do *software* MATLAB foram utilizadas para a decomposição dos sinais. A melhor resposta foi obtida com a *wavelet*-mãe *reverse biorthogonal (rbio)*, na qual se verificou a maior correlação com os sinais decompostos.

Keow, Nallagownden e Rao, (2010), sugeriram um método de detecção e classificação de perturbações que utilizou os coeficientes *wavelet* e um algoritmo baseado em árvore de decisão para extrair e analisar características dos sinais decompostos pela técnica AMR. O *software* MATLAB foi usado para testar a viabilidade do método proposto. A função db4, em até treze níveis de decomposição, foi implementada e, posteriormente, a energia de cada coeficiente de detalhe obtido foi calculada a fim de averiguar os perfis das perturbações. No decorrer do estudo constatou-se que o primeiro e o quarto nível de decomposição foram suficientes para promover a identificação correta das perturbações. Um limiar foi usado para que a parcela do sinal que apresenta uma energia média no quarto nível de decomposição seja classificada com distorção harmônica. O valor da tensão em RMS também foi calculado para usá-lo como parâmetro na detecção. O estudo não realiza testes com o efeito do ruído.

Mahmoudi *et al.* (2010) apresentaram, a partir da TW, os seguintes métodos: método do desvio padrão, do cálculo de energia e seletivo de *wavelet*. Os autores afirmaram que para cada distúrbio uma *wavelet* Daubechies, que tenha o melhor desempenho para detectá-lo, e um nível específico de decomposição (implementou-se até 10 níveis) deve ser aplicado, sendo assim, o método seletivo de *wavelet* é possível. A energia do sinal é usada para classificação. Tentando resolver os problemas computacionais da metodologia inicialmente proposta, um novo método de baixa capacidade computacional, detecção simultânea de perturbações e combinação de três etapas principais – detecção, processamento e comparação – foi sugerido pelos autores. Para cada perturbação, a energia do sinal correspondente e os seus níveis de decomposição foram estudados. Para simplificar os cálculos, apenas um nível de decomposição foi usado. Este método também detectou o tempo das perturbações.

Chunling *et al.* (2011) avaliaram o uso de uma técnica de detecção de distúrbios aplicando-se a TW nos sinais de tensão. Os autores utilizaram a *wavelet packet basic*, presente no *software* MATLAB, para testar as *wavelet* Daubechies presentes nessa biblioteca em diversos níveis de decomposição *wavelet*. De acordo com as características do sinal, uma seleção adaptativa de banda de frequência foi possível de modo a combinar com o espectro de sinal, aumentando assim a resolução de tempo-frequência. Neste trabalho os autores afirmaram que a mesma técnica pode ser usada em sinais de corrente, já que, na interface proposta não é necessário programar de fato, é preciso apenas mudar a *wavelet* de base, o que possibilita a obtenção de resultados diferentes a fim de facilitar a comparação.

Em (NICOLAE, NICOLAE e NICOLAE, 2012), os autores aplicaram a TWD, via AMR. Primeiramente a forma de onda original foi decomposta e analisaram-se regimes não estacionários no SEP, sob restrições de operação em tempo real. Estudos comparativos dos resultados obtidos com as funções simuladas no *software* MATLAB, como a *dwt*, foram realizados para os mesmos valores de filtros e valores diferentes para a *dwtmode*. As desvantagens dos algoritmos utilizados pelo MATLAB estão relacionadas ao arredondamento de duas importantes propriedades da decomposição: a preservação da norma (que é crucial para a avaliação dos índices de QE) e a ortogonalidade. Estas propriedades afetam a detecção de faltas e/ou podem introduzir detecções de “faltas falsas”. O método original preservou a propriedade de reconstrução perfeita.

Kamble *et al.* (2013) estudaram os DQE caracterizados pela presença de harmônicos e perturbações transitórias. O uso da TWD como método capaz de analisar a composição desses distúrbios foi considerado, para isso, a *wavelet* Daubechies 9 (db9) em até sete níveis de decomposição foi calculada. O índice DHT de cada sinal também foi calculado com o uso da TF. Dessa forma, os coeficientes *wavelet* obtidos com a TWD foram comparados aos índices DHT para que um conjunto de características dos DQE fosse identificado. De acordo com as informações fornecidas, conclui-se que a TWD é uma técnica ótima quando utilizada para detecção das componentes de alta frequência presentes nos sinais. Uma característica denominada pico máximo foi extraída a partir da comparação entre os coeficientes *wavelet* dos distúrbios com os coeficientes *wavelet* do sinal puro, sem perturbação.

No ano seguinte, (DE APRÁIZ, BARROS e DIEGO, 2014), realizaram a detecção em tempo real, a extração e a análise de perturbações transitórias em sistemas de baixa tensão. O algoritmo desenvolvido baseou-se no método da janela deslizante e aplicou a TWD de um sinal de diferença computado no domínio do tempo, comparando cada amostra de tensão com sua amostra correspondente no período anterior (sinal de referência). Se a diferença exceder um

limite definido (o limite de captura), então o sinal é decomposto em diferentes bandas de frequência, aplicando TWD e calculando a energia das bandas de saída. O método foi insensível à distorção harmônica estacionária e apresentou baixa sensibilidade ao ruído. Diferentes sinais de teste, transientes oscilatórios, transientes impulsivos, transientes multifrequenciais, variações de valor médio quadrático de curta duração e sinais transitórios reais foram usados para constatar a eficácia do método desenvolvido.

Vários sinais de eventos de QEE – *sag*, *swell*, harmônicos, interrupção, *flicker*, transitórios de alta frequência e transitórios de baixa frequência – em redes inteligentes foram simulados e diagnosticados de acordo com suas equações paramétricas em (ALSHAHIRANI, ABBOD e ALAMRI, 2015). Os recursos de DQE foram extraídos e um cálculo de valores de energia foi realizado para cada evento. Essas energias foram usadas para construir a base de dados necessária para o classificador. O sistema de classificação ocorre nas seguintes etapas: simulação dos eventos; detecção baseada na TW; extração dos parâmetros; construção da base de dados com os eventos; treinamento da RNA; testes e validações. Como resultado, a precisão do classificador foi superior a 90%.

Em 2016, Sahani *et al.* (2016) propuseram a TWD, via AMR, para analisar, detectar e classificar sinais de perturbação em diferentes frequências. No *software* MATLAB a *wavelet packet* foi usada para calcular a decomposição *wavelet*. Os índices de energia foram extraídos para quatorze classes de DQE analisados com o *wavelet* db4, em até dez níveis de decomposição. As variações nos índices de energia de perturbação dos coeficientes de detalhe e de aproximação da *wavelet* foram usadas como entradas em um novo classificador chamado máquinas de aprendizado extremo. Os resultados apontaram que o método foi competente e pode classificar eventos simultâneos – únicos e múltiplos – com precisão na presença de ruído.

Bíscaro *et al.* (2016) realizaram a detecção automática de faltas através do monitoramento contínuo de oscilografias dos registros das correntes trifásicas registradas em um sistema de medição presente em uma subestação. O diagnóstico rápido e preciso do tipo de falta e DQE foi possível a partir das combinações técnicas, tais como TW, AMR e RNA Fuzzy ARTMAP, além dos conceitos de energia do sinal. Assim, a detecção foi realizada usando a *wavelet* db4 até o quarto nível de decomposição. O comportamento de todo o sinal foi examinado, comparando a variação máxima dos coeficientes de detalhe da *wavelet* com o desvio padrão, que forneceu resultados imunes à presença de ruído. Os DQE foram simulados no *software* ATP/EMTP. Dito isso, 12 RNA Fuzzy ARTMAP foram treinadas e usadas para classificar os DQE. Uma estimativa geográfica do ponto defeituoso também foi realizada.

Abbas *et al.* (2016) verificaram a aplicabilidade de um algoritmo que não dependa de um limiar para promover a detecção e classificação de perturbações. A TWD, via AMR, foi utilizada para extrair as sub-bandas de frequência e fornecer os recursos necessários para identificação do fenômeno CI. Os autores demonstraram que o uso da db4, com dois níveis de decomposição, é suficiente para fornecer as características que diferenciam a ocorrência do fenômeno CI da ocorrência de uma falta. Uma das etapas mais cruciais deste trabalho foi projetar um transformador de potência com dados precisos (240 MVA, 345/38.5 kV e $Y - \Delta$) capaz de caracterizar a ocorrência da CI para diferentes ângulos de comutação.

Kamthekar *et al.* (2017) utilizaram os coeficientes *wavelet* para extrair características de vários DQE e classificá-los com base na TWD, via AMR. A energia de entropia foi extraída para otimizar o módulo de classificação. Todos os DQE - como interrupção de tensão, afundamento e harmônicos - foram gerados para fins de simulação no *software* MATLAB. A *wavelet* Daubechies 6 (db6) até o décimo nível de decomposição foi escolhida. Após a detecção de DQE, uma classificação dividida em fenômenos estacionários e transitórios foi realizada. Com essa técnica foi possível diferenciar e analisar os sinais de distúrbios separadamente, assim, qualquer alteração na forma de onda pode ser detectada e localizada no nível de resolução mais refinado. No total, nove eventos com a onda senoidal pura foram utilizados para a análise das técnicas propostas.

Mais tarde, Dekhandji (2017) propôs uma técnica de detecção e reconhecimento de DQE baseado na TWD, usando a *wavelet* db4. As decomposições foram implementadas em até quatro níveis e forneceram quatro coeficientes de detalhe. Constatou-se que o desvio padrão dos coeficientes de detalhe foram diferentes para cada DQE. Os resultados apresentados demonstraram a eficácia do método proposto de tal forma que o maior tempo de detecção obtido para todos os tipos de distúrbios foi menor que 1/4 de ciclo. A TWD detectou uma falta fase-terra com 3,3 ms de atraso. Os harmônicos foram detectados com pouco tempo de atraso, quando comparado aos demais distúrbios.

A fim de distinguir a ocorrência do fenômeno CI de falhas internas no transformador, Gondane *et al.* (2018), extraíram as energias dos coeficientes *wavelet* de diferentes sinais de correntes obtidos durante condições diversas de operação de um SD. A db4 em seu quinto nível de decomposição *wavelet* foi empregada para analisar e detectar as componentes de frequência presentes no sinal CI. A RNA também foi utilizada para classificar os dados com base nas propriedades específicas do fenômeno. Os autores afirmaram que a CI pode apresentar amplitudes 20 vezes maiores que as amplitudes das correntes normais de operação, podendo

durar cerca de 10 ms. Entre 30 e 40 ciclos são necessários para que a corrente se estabilize em seu valor normal.

Thangarai *et al.* (2019) desenvolveram uma abordagem baseada na técnica *wavelet* com o objetivo de estimar a presença de harmônicos no SEP. Este artigo compara o desempenho do método proposto, usando a *wavelet* Daubechies 20 (db20) até o terceiro nível de decomposição, para várias condições de simulação no *software* MATLAB. Com a definição de um limiar específico para o coeficiente *wavelet* de detalhe, a técnica eliminou os coeficientes de menor magnitude e estimou apenas os coeficientes mais significativos. Dessa forma, os resultados foram apresentados sem perda das informações relevantes. A localização do instante inicial e final da perturbação também foi possível.

Uma abordagem inteligente foi proposta por Jandan *et al.* (2019). Os autores afirmaram que uma metodologia – capaz de detectar, reconhecer e classificar DQE – baseada na TWD, via AMR, contribuiu para uma manutenção preventiva eficaz no SEP. Os distúrbios (*sags*, *swells*, harmônicos e transientes impulsivos) foram simulados no *software* MATLAB ao mesmo tempo que as características mais relevantes dos fenômenos (energia, entropia e desvio padrão do sinal) foram extraídas a partir dos coeficientes *wavelet* de detalhe e de aproximação. Outra ferramenta classificadora, MVS, foi simulada para reconhecer e classificar os distúrbios mesmo com uma base de dados pequena para treinamento. Os resultados apontaram para boa precisão da metodologia proposta.

3.1 ANÁLISE DA BIBLIOGRAFIA

No decorrer do levantamento bibliográfico constatou-se a existência de determinadas limitações que sob condições restritivas – equipamentos de proteção instalados ao potencial e taxa de amostragem baixa – podem definir o uso das metodologias propostas sob a perspectiva deste trabalho.

Um fato importante a ser observado é que os trabalhos supracitados não utilizaram a TWD como técnica responsável por classificar as perturbações analisando-se apenas os sinais característicos de corrente. Por isso, uma metodologia capaz de classificar perturbações com base apenas no sinal de corrente é proposta, a partir de duas bases de dados (simulada e real), por meio das quais será possível averiguar as diferentes *wavelet* Daubechies e os níveis de decomposição. Além disso, os trabalhos mais relevantes para o desenvolvimento desta pesquisa são apresentados resumidamente na Tabela 3.

Tabela 3 – Evolução das técnicas de monitoramento que buscam um diagnóstico preciso de DQE e de faltas no SEP com base na TW.

Ano	Pesquisadores	Contribuições	VS	VR	ST	SC	DQE	F	CI
2002	Xiangxun	A detecção e localização propostas limitaram-se a determinação do instante inicial e da duração do evento.	•		•		•		
2003	Saleh <i>et al.</i>	Para diferentes condições de simulação provou-se que é possível diferenciar a ocorrência do CI de outros fenômenos típicos.	•			•		•	•
2006	Kim <i>et al.</i>	Além de aplicar a TW, fez uso de recursos, tais como: média, desvio padrão, assimetria, curtose, RMS, fator de forma, fator de crista e TF.		•	•		•		
2009	Zang <i>et al.</i>	A partir da TW e da MVS detectou e classificou os DQE infectados com ruído.	•		•		•	•	
2010	Mokryani <i>et al.</i>	Detectou e classificou CI, diferenciando-a de faltas monofásicas, a partir de simulações no ATP, em um sistema-teste IEEE de 14 barras.	•			•		•	•
2010	Keow <i>et al.</i>	Aplicou técnicas como TW, AMR e árvore de decisão. O artifício energia e tensão RMS foram usados para detectar e classificar perturbações.	•		•		•		
2014	Apráziz <i>et al.</i>	Comparou o sinal com falta com um de referência puro com o uso da TWD. O método foi insensível à distorção harmônica estacionária e apresentou baixa sensibilidade ao ruído	•		•				•
2015	Alshahrani <i>et al.</i>	Além de utilizar a TW, aplicou a RNA a fim de classificar os eventos, a partir de uma base de dados analisada com o cálculo das energias.	•		•		•		
2016	Sahani <i>et al.</i>	Desenvolveu um classificador denominado ELM e aplicou a wavelet packet presente no software MATLAB.	•		•		•		
2016	Bíscaro <i>et al.</i>	Utilizou três técnicas: TW, AMR e RNAs Fuzzy ARTMAP, comparando a variação máxima dos coeficientes de detalhe com o desvio padrão.	•		•	•	•	•	
2017	Kamthekar <i>et al.</i>	Aplicou a db6 até o décimo nível de decomposição e extraiu a energia de entropia para otimizar o módulo de classificação.	•		•		•		
2018	Gondane <i>et al.</i>	Distinguiu a ocorrência da CI de falhas internas no transformador.	•			•			•
2019	Thangarai <i>et al.</i>	Utilizou a db20 até o terceiro nível de decomposição para estimar a presença de harmônicos nos registros oscilográficos.	•		•		•		
2019	Jandar <i>et al.</i>	Utilizou a energia, entropia e desvio padrão dos coeficientes wavelet de detalhe e de aproximação para detectar, reconhecer e classificar os DQE.	•		•		•		
2020	Chagas (este trabalho)	Uma classificação automática de DQE e faltas no SEP foi realizada, com base na TWD, a partir exclusivamente da análise das formas de onda de corrente.	•	•		•	•	•	•

VS – Validação a partir de testes em oscilografias e/ou sistemas simulados

VR – Validação a partir de testes em oscilografias e/ou sistemas reais

ST – Sinais de tensão

SC – Sinais de corrente

DQE – Distúrbios de qualidade de energia

F – Faltas no SEP

CI – Corrente de *inrush*

Fonte: autoria própria.

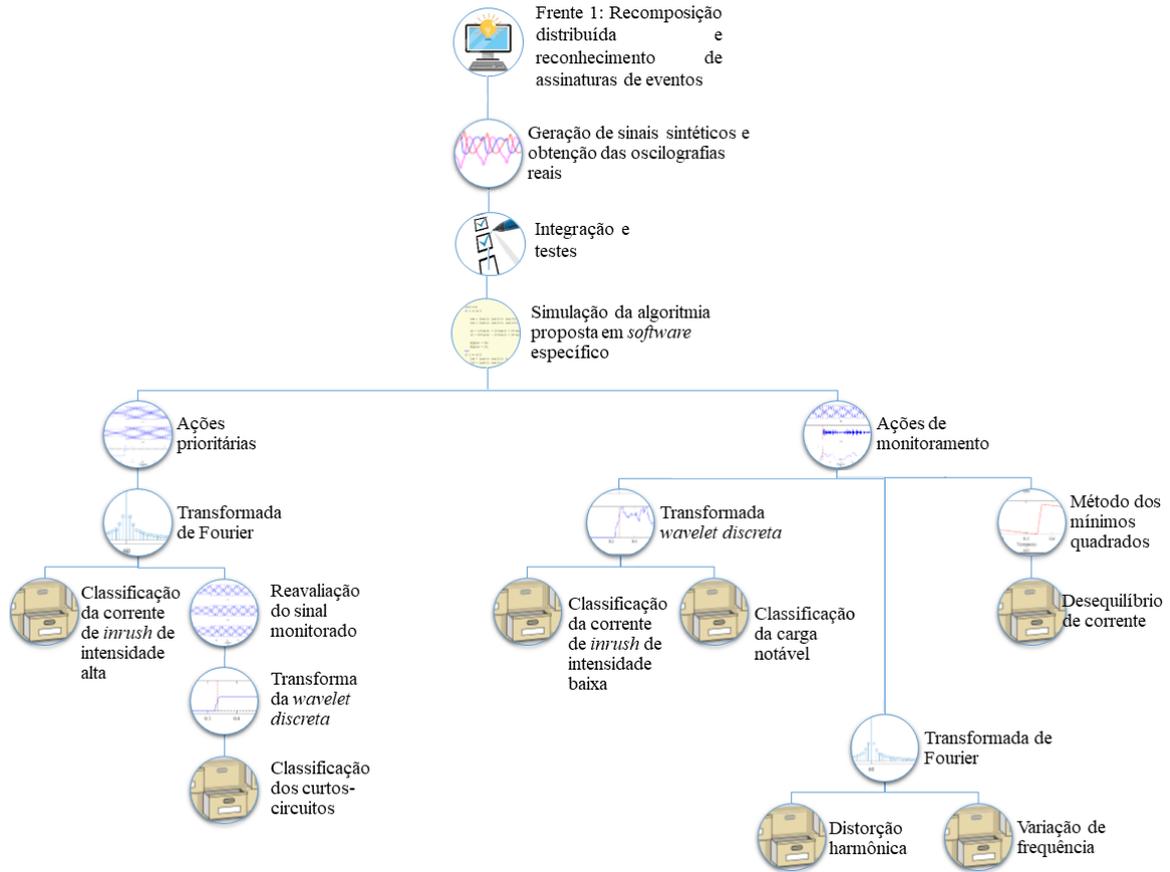
4 METODOLOGIA

A estrutura básica do sistema proposto de classificação de determinados DQE e faltas no SEP é apresentada nos subtópicos a seguir. Seu objetivo principal é demonstrar como é possível classificar as anomalias ocorridas ao longo dos alimentadores de distribuição com elevada confiabilidade, rapidez e empregando apenas sinais de corrente adquiridos no SD.

Na Figura 7 apresenta-se, de forma resumida, a sequência das principais etapas que fizeram parte desta pesquisa. Essa ilustração está interligada com o esquema apresentado na Figura 2, Capítulo 1, e tem por objetivo oferecer uma ideia preliminar e panorâmica de como a metodologia foi dividida. O algoritmo proposto foi desenvolvido na UFS e fará parte de *hardware* embarcado, desenvolvido na UFPA, responsável pela integração dessas funções inteligentes ao equipamento interruptor.

Conforme observada na Figura 7, a primeira etapa realizada na Frente 1 compreende a construção de uma base de dados composta por sinais sintéticos (simulados no *software* ATP) e sinais reais (fornecidos pela EDP Brasil). A segunda etapa refere-se à realização de testes a partir de simulações do algoritmo proposto em *software* específico. Esta etapa divide-se em duas: ações prioritárias, a partir das quais aplica-se os algoritmos da TF e TWD a fim de promover a classificação dos quatro tipos de curtos-circuitos e da CI de intensidade alta (potencialmente confundida com o surgimento de um curto-circuito durante as ações de reconhecimento de distúrbios em SD reais); e as ações de monitoramento, nas quais aplicam-se três métodos, TWD, TF e MMQ, por meio dos quais identifica-se a ocorrência de uma CI de intensidade baixa (forma de onda similar a uma senoide pura), carga notável, como também, monitoram-se os índices relacionados à distorção harmônica, variação de frequência e desequilíbrio de corrente.

Figura 7 – Sequência das principais etapas da pesquisa.

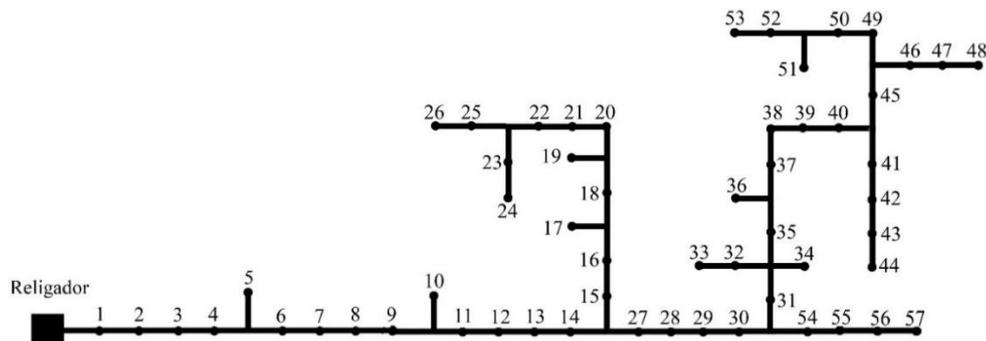


Fonte: autoria própria.

4.1 SISTEMA ELÉTRICO EM ESTUDO

Um sistema-teste de distribuição foi modelado no *software* ATP, a partir de modelos característicos do ATPDraw e de um pré-processamento, geração de rotinas e avaliação de parâmetros, realizado no ATP-EMTP. O diagrama unifilar do sistema-teste de distribuição é apresentado na Figura 8.

Figura 8 – Diagrama unifilar do alimentador modelado.



Fonte: autoria própria.

Todos os dados georreferenciados do alimentador e suas respectivas cargas distribuídas ao longo dos transformadores baseiam-se em dados de um SD real fornecidos pela EDP Brasil. As seguintes características também foram fornecidas para a modelagem do sistema-teste construído no ATP:

- Linhas trifásicas não transpostas em parâmetros distribuídos e constantes;
- Cargas próximas aos pontos ao longo do alimentador, agrupados em um único barramento, resultante de um alimentador com 57 nós;
- Trechos compostos por condutores homogêneos do tipo Poppy;
- Fator *skin* para os cabos de 0,5;
- Resistividade da terra de 100 Ω/m ;
- Modelo de impedância constante para as cargas, considerando um modelo π de linha de distribuição, que leva em consideração os parâmetros distribuídos (resistência, capacitância, indutância e condutância).

4.2 BASE DE DADOS

Para que este estudo atenda aos requisitos de classificação de determinados DQE e faltas no SEP, simulações computacionais via *softwares* específicos foram realizadas. Abaixo são apresentados os *softwares* empregados:

- ATP – usado para simulação digital de fenômenos transitórios de natureza eletromagnética e eletromecânica em sistemas de energia elétrica;
- MATLAB – ambiente de simulação utilizado para realizar manipulações matriciais, gráficos de funções e dados, programação de algoritmos etc.

No ATP foram simulados os seguintes fenômenos relacionados com a QE:

- i. Curto-circuito fase-terra;
- ii. Curto-circuito fase-fase;
- iii. Curto-circuito fase-fase-terra;
- iv. Curto-circuito trifásico;
- v. Saturação de núcleos magnéticos (corrente de *inrush*);
- vi. Carga notável (não se trata de uma falta, mas a simulação deste fenômeno é necessária para averiguar a seletividade da metodologia proposta).

Apesar dos arquivos de saída de todas as simulações disponibilizarem sinais de tensão e corrente nos pontos de interesse do SD simulado, apenas os sinais de corrente a partir do nó 1 (religador na subestação) foram considerados. A corrente no nó 1, resultante do somatório das correntes de carga de todo o sistema, foi adotada como único parâmetro de entrada para o processo de classificação, afinal, os equipamentos em desenvolvimento no âmbito do P&D possuem como característica o fato de serem instalados ao potencial.

Todas as oscilografias possuem uma taxa de amostragem de 15.360 amostras/segundo, que é a frequência de amostragem típica adotada pelos registradores digitais de perturbação (RDP). Para facilitar a visualização dos resultados, o momento da ocorrência da falta nas simulações é determinado sempre em 0,333 s.

Para simular os curtos-circuitos, quatro condições foram atendidas e variadas de acordo com as condições da simulação:

- Tipo da falta (fase-terra, fase-fase-terra, fase-fase e trifásica);
- Distância da falta do nó escolhido para o nó 1 (religador na subestação);
- Ângulo de incidência da falta;
- Impedância de falta.

Para construir a base de dados, foram escolhidos aleatoriamente, conforme mostrado na Figura 8, 10 nós do sistema-teste. Adicionalmente, os nós 1 e 57 foram escolhidos, dada a relevância na avaliação do desempenho dos sistemas simulados (o nó 1 o mais próximo da subestação e o nó 57 o mais distante). A carga em cada nó variou em 20%, 60% e 100%, em cada situação de falta. Esses carregamentos também foram escolhidos aleatoriamente para que fosse possível avaliar a abrangência do método em diferentes cenários. Ao todo, 120 simulações de curtos-circuitos foram efetuadas.

Para simular o fenômeno CI, um modelo de transformador saturável disponível no ATP (*Branch Transformer* ou rotina *BCTRAN* no ATP) foi utilizado com as seguintes características:

- Conexão Δ -Y aterrada;
- Tensão de linha igual a 13,8/0,380 kV;
- Potência nominal em 30 kVA.

Essas características referem-se a um transformador de potência relativamente baixa. Isso quer dizer que os fenômenos CI simulados correspondem aos casos mais difíceis quanto a classificação, devido à baixa amplitude da assinatura CI. Transformadores com potências

maiores também foram utilizados e os fenômenos CI obtidos foram classificados, sem maiores dificuldades, pelo algoritmo proposto.

Em cada uma das simulações o transformador foi conectado a um nó diferente do sistema-teste, por meio de uma chave controlada por tempo (T_{close} e T_{open}). Essa chave foi adicionada em um nó teste permitindo a energização do nó seguinte (por exemplo, nós 15 e 16). Para diversificar o local de ocorrência da CI todos os 57 nós do sistema-teste foram empregados e a carga (20%, 40%, 60%, 80% e 100%) foi variada aleatoriamente em cada um deles. Ao todo foi possível obter 285 casos de CI.

Para avaliar a seletividade da metodologia, 30 casos de carga notável (ou energização de carga) foram simulados. Ao todo, 10 nós foram escolhidos – os mesmos utilizados para a simulação dos curtos-circuitos – e a carga foi variada em 20%, 60% e 100%. A simulação desse fenômeno foi possível a partir da adição de uma chave em arranjo similar ao que foi realizado no caso da CI.

O número total de cada tipo de fenômeno simulado é mostrado na Tabela 4.

Tabela 4 – Base de dados simulada.

Fenômeno simulado	Número de oscilografias
Curto-circuito fase-terra A	10
Curto-circuito fase-terra B	10
Curto-circuito fase-terra C	10
Curto-circuito fase-fase AB	10
Curto-circuito fase-fase AC	10
Curto-circuito fase-fase CB	10
Curto-circuito fase-fase-terra AB	10
Curto-circuito fase-fase-terra AC	10
Curto-circuito fase-fase-terra CB	10
Curto-circuito trifásico	30
Corrente de <i>inrush</i>	285
Carga notável	30
TOTAL	435

Fonte: autoria própria.

Os demais DQE – distorção harmônica, variação de frequência e desequilíbrio de corrente – também foram simulados, mas em menor quantidade. Ao todo, cerca de 25 casos de cada um desses fenômenos foram simulados nos *softwares* ATP e MATLAB.

Uma segunda base de dados com 41 grupos de oscilografias registradas em subestações de distribuição reais, conforme Tabela 5, foi fornecida pela EDP Brasil. No mínimo, oscilografias típicas de quatro tipos de topologias diferentes de SD reais foram obtidas. Trechos

dessas oscilografias em que se observou a ocorrência de curtos-circuitos foram analisados. Esses sinais também passaram por uma reamostragem para 15.360 amostras/segundo.

Tabela 5 – Base de dados real.

Fenômeno simulado	Número de registros
Curto-circuito fase-terra A	4
Curto-circuito fase-terra B	2
Curto-circuito fase-terra C	4
Curto-circuito fase-fase AB	1
Curto-circuito fase-fase AC	3
Curto-circuito fase-fase CB	21
Curto-circuito trifásico	6
TOTAL	41

Fonte: autoria própria.

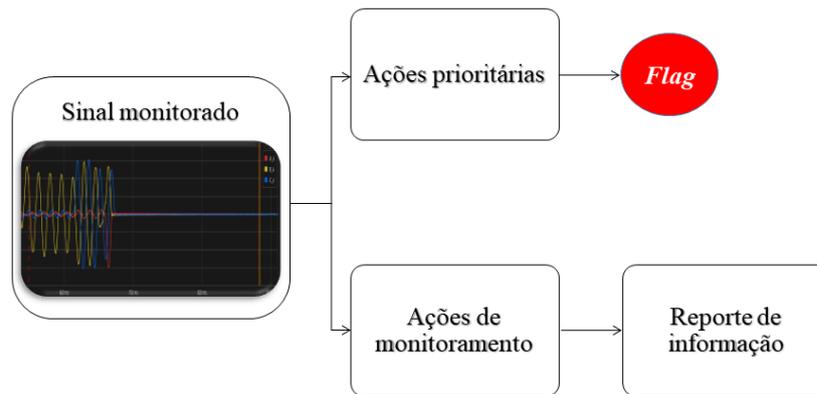
Assim, uma base de dados diversificada foi construída e a partir dela foi possível avaliar o desempenho da metodologia proposta.

4.3 PROCEDIMENTO PARA CLASSIFICAÇÃO GERAL DOS SINAIS

Todos os algoritmos apresentados nesta seção foram programados no *software* MATLAB. O processo de classificação geral dos sinais é, majoritariamente, baseado na TWD, no entanto, técnicas como TF e MMQ também são utilizadas.

Considerando que unidades de monitoramento (como a CPU de um religador, por exemplo) são capazes de medir, registrar e disponibilizar oscilografias contendo a presença de distúrbios, duas formas de atuação dos algoritmos foram definidas: ações prioritárias e ações de monitoramento. De maneira geral, o processo de classificação de fenômenos ocorre de acordo com o fluxograma apresentado na Figura 9.

Figura 9 – Processo de classificação: Sinal monitorado.



Fonte: autoria própria.

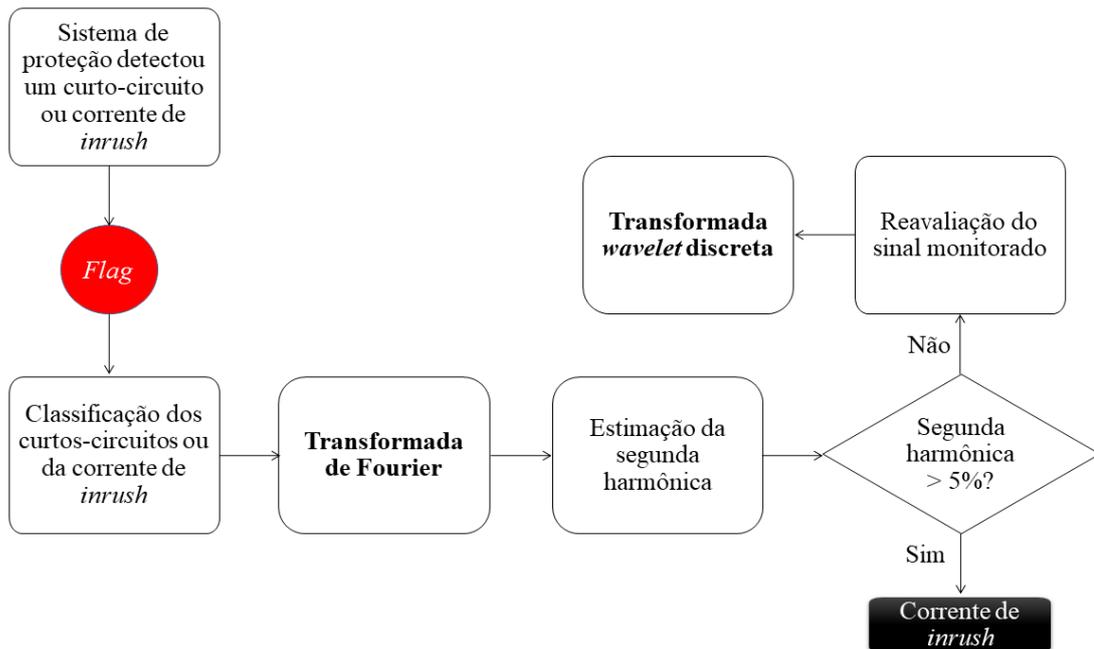
Inicialmente, conforme descrito na Figura 9, o sinal monitorado percorre dois caminhos diferentes de fluxo. Caso venha acompanhado de um *flag* de falta serão aplicadas as ações prioritárias sobre este sinal. Caso contrário, será tratado pelas ações de monitoramento. Nas subseções a seguir cada tipo de ação é detalhada.

4.3.1 AÇÕES PRIORITÁRIAS

Na lógica de funcionamento do *hardware* embarcado contendo o algoritmo proposto, as ações prioritárias são acionadas por um *flag* que indica que o sistema de proteção detectou uma falta. Em outras palavras, não é função dos algoritmos propostos detectar a falta, mas sim classifica-las. Nesta etapa o sistema deve classificar o fenômeno em um entre os cinco fenômenos possíveis (quatro classes de curtos-circuitos ou CI de intensidade alta o suficiente para sensibilizar a proteção).

Na Figura 10 apresenta-se o diagrama de blocos do algoritmo proposto para realizar a classificação.

Figura 10 – Processo de classificação: Ações prioritárias (classificação da CI a partir da TF).

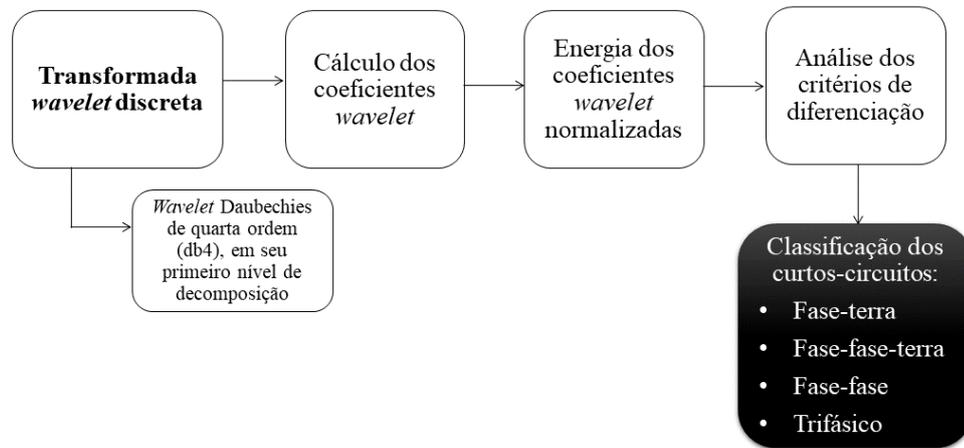


Fonte: autoria própria.

Inicialmente a TF é usada a fim de estimar a presença da segunda harmônica. A depender da intensidade desta componente harmônica o algoritmo é capaz de classificar o fenômeno em um surto do tipo *inrush* ou em algum dos curtos-circuitos, já que, eventualmente, estes fenômenos podem ser confundidos em algoritmos clássicos de proteção. O limiar estabelecido nesta etapa baseou-se em (YABE, 1997; WANG e HAMILTON., 2008; HAMILTON, 2013), e definiu-se que se o valor da segunda harmônica for maior que 5% do valor da primeira harmônica, nas três fases, o fenômeno detectado é uma CI.

Não havendo a detecção da segunda harmônica significativa, o sinal monitorado será reavaliado com a aplicação da TWD. Na Figura 11, as etapas inerentes ao bloco da TWD são observadas. Neste caso, os perfis de energias dos coeficientes *wavelet* de aproximação fornecem as informações necessárias para diferenciar os tipos de curtos-circuitos a partir da criação dos critérios de diferenciação.

Figura 11 – Processo de classificação: Ações prioritárias (classificação dos curtos-circuitos a partir da TWD).



Fonte: autoria própria.

A TWD baseou-se, inicialmente, na definição da *wavelet*-mãe e do nível de decomposição mais adequados. Nesta metodologia, a *wavelet* Daubechies de quarta ordem (db4) foi empregada, particularmente, em seu primeiro nível de decomposição. A db4 é, na maioria das vezes, a *wavelet* aplicada na detecção e classificação de distúrbios (XIANGXUN, 2002; CÉSAR, VALDOMIRO e GABRIEL, 2006; SAHANI, MISHRA, *et al.*, 2016; BÍSCARO, PEREIRA, *et al.*, 2016; DEKHANDJI, 2017).

Quanto ao nível de decomposição, este é selecionado de acordo com os casos que estão sob investigação, a fim de obter-se o melhor nível de desempenho do método (MAHMOUDI, HOSSEINIAN e DOROUDI, 2010). Considerando as características do fenômeno, verificou-se que o desempenho da metodologia proposta é adequado em seu 1º nível de decomposição *wavelet*. Outros testes, até o 8º nível de decomposição *wavelet*, foram realizados. A partir deles foi possível concluir que até o 6º nível de decomposição os resultados são análogos, reduzindo a escolha do nível mais adequado (1º nível) ao critério de menor custo computacional e eficiência. No 7º e 8º nível de decomposição *wavelet* um decaimento da eficiência da metodologia foi observado, o que decorre da redução do número de amostras dos coeficientes *wavelet*.

A partir da TWD e da AMR, os coeficientes *wavelet* de detalhe e de aproximação dos sinais de correntes trifásicas foram extraídos. Com esses resultados, os valores das energias desses coeficientes foram obtidos.

Em regra, a TWD permite a escolha de qual decomposição – de acordo com as características de frequência extraídas – é a mais adequada e vantajosa segundo as características mais atrativas para análise dos fenômenos estudados. Neste caso, a energia do coeficiente de aproximação é o parâmetro básico responsável pela classificação eficaz desses fenômenos. A normalização dos perfis de energia é realizada a partir do valor máximo obtido nas oscilografias das três fases da corrente e da corrente de neutro. Assim, a extração da energia janelada dos coeficientes *wavelet* de aproximação em primeira escala foi empregada.

O conjunto de regras ou critérios de diferenciação baseia-se na análise comparativa entre as energias das três correntes de fase (I_a , I_b e I_c) e da energia da corrente de neutro (I_n) – deduzida a partir das correntes de fase (STEVENSON, 1982) – no estado de falha durante o janelamento com largura de 1, 2, 3 ou 4 ciclos. A largura da janela foi variada para que se avaliasse a robustez da metodologia. Ademais, um limiar λ , a ser comparado com os valores de energia obtidos durante o janelamento, foi definido.

Em um curto-circuito do tipo fase-terra, por exemplo, a energia máxima na fase em que a falta ocorreu deve ser maior que λ , enquanto as demais devem apresentar valores de energia máximos próximos a zero. Para os curtos-circuitos fase-fase e fase-fase-terra, além de comparar as energias nas correntes de fase, o valor máximo de energia de I_n também é analisado. Esse valor deve ser menor que o limiar k ($I_n < k$) durante a ocorrência do curto-circuito fase-fase e maior que esse limiar ($I_n > k$) para curto-circuito fase-fase-terra. Quanto a identificação do curto-circuito trifásico compara-se o valor das energias máximas que devem ser, simultaneamente, maiores que λ . Na Tabela 6 essas relações definidas entre os valores máximos das energias dos coeficientes de aproximação e os limiares λ e k são apresentadas.

Tabela 6 – Critérios de diferenciação.

Critérios de diferenciação				Diagnóstico
$\max(\text{Energia}_{Ia})$	$\max(\text{Energia}_{Ib})$	$\max(\text{Energia}_{Ic})$	$\max(\text{Energia}_{In})$	
$> \lambda$	$< \lambda$	$< \lambda$	Não avaliado	Fase-terra A
$< \lambda$	$> \lambda$	$< \lambda$	Não avaliado	Fase-terra B
$< \lambda$	$< \lambda$	$> \lambda$	Não avaliado	Fase-terra C
$> \lambda$	$> \lambda$	$< \lambda$	$< k$	Fase-fase AB
$> \lambda$	$< \lambda$	$> \lambda$	$< k$	Fase-fase AC
$< \lambda$	$> \lambda$	$> \lambda$	$< k$	Fase-fase BC
$> \lambda$	$> \lambda$	$< \lambda$	$> k$	Fase-fase-terra AB
$> \lambda$	$< \lambda$	$> \lambda$	$> k$	Fase-fase-terra AC
$< \lambda$	$> \lambda$	$> \lambda$	$> k$	Fase-fase-terra BC
$> \lambda$	$> \lambda$	$> \lambda$	Não avaliado	Trifásica

Fonte: autoria própria.

A energia⁴ foi calculada a partir de uma janela deslizante de tamanho fixo igual a 128 amostras (meio ciclo) a fim de manter as características originais dos coeficientes *wavelet*. Essa janela move-se amostra por amostra sequencialmente e a cada passo a energia é calculada. Dessa maneira, o parâmetro de energia mostrou-se capaz de mensurar as frequências individuais que caracterizam os transientes gerados pelos curtos-circuitos (neste caso particular, de corrente). Durante as ações prioritárias, apesar de nenhuma informação do período pré-falta ou pós-falta ser necessária, as mesmas podem ser opcionalmente incluídas, não devendo impactar na eficácia da metodologia.

4.3.2 AÇÕES DE MONITORAMENTO

As ações de monitoramento são realizadas continuamente, independente de sinalização (*flag*) emitida pela unidade de monitoramento principal. Estas ações devem garantir a correta detecção e classificação dos seguintes fenômenos, em tempo real:

- i. Saturação de núcleos magnéticos (corrente de *inrush* de intensidade baixa);
- ii. Carga notável;
- iii. Distorção harmônica;
- iv. Desequilíbrio de corrente;
- v. Variação de frequência.

Para realizar a tarefa, três procedimentos são realizados em paralelo, sendo cada um deles responsável pela detecção e classificação de determinados distúrbios listados.

O primeiro procedimento propõe-se a diferenciar a ocorrência de um fenômeno CI de baixa intensidade da carga notável em SD, aplicando-se a TWD. Já o segundo, realiza o monitoramento contínuo e em tempo real dos sinais de corrente, a partir da TF, a fim de identificar os valores de distorção harmônica e variação de frequência que não atendem aos padrões estabelecidos pelas normas e procedimentos elencados no Capítulo 2. O terceiro e último procedimento analisa, em tempo real, o desequilíbrio entre as três fases das correntes, a partir do MMQ, reportando os resultados que contradizem os limites estabelecidos pelo PRODIST.

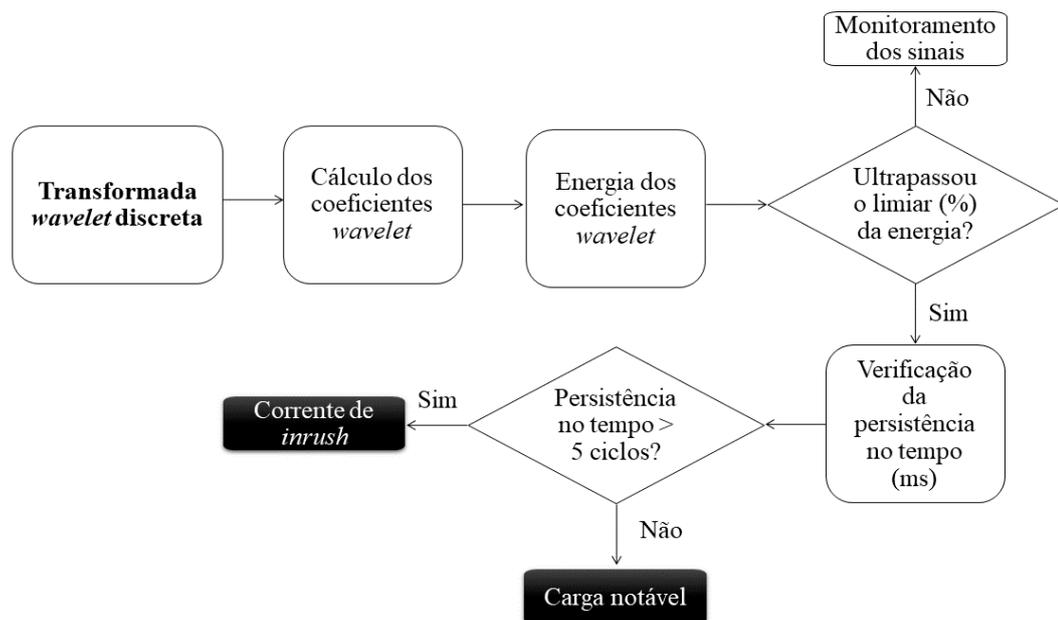
Na Figura 12, a primeira etapa das ações de monitoramento é observada. A db4 é calculada, em seu segundo nível de decomposição, e os coeficientes *wavelet* de detalhe e seus

⁴ Energia do sinal: $E = \sum_i Sinal_i^2$.

respectivos perfis de energia são extraídos para que se verifique se um limiar definido foi atingido: caso positivo, o passo seguinte é a verificação do tempo de persistência do valor de energia acima do limiar (detecção de CI de baixa intensidade ou carga notável); caso negativo, não houve detecção de distúrbio e o monitoramento deve continuar.

Em caso de cruzamento do limiar, a observação da persistência no tempo permite a diferenciação entre a carga notável e a CI que, neste caso, é caracterizada por amplitudes baixas que não sensibilizam os algoritmos de desligamento por curto-circuito.

Figura 12 – Processo de classificação: Ações de monitoramento (TWD).

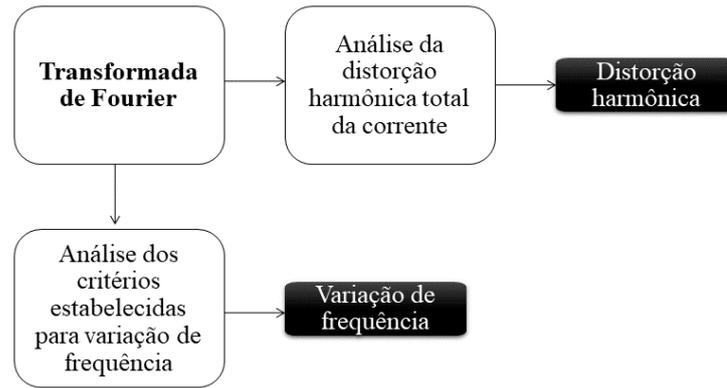


Fonte: autoria própria.

Este monitoramento é realizado em tempo real e inicia-se no instante em que a primeira amostra da energia ultrapassar o valor do limiar da energia β . No Brasil, de acordo com as normas brasileiras, em redes de transmissão e distribuição com tensão nominal até 345 kV, dispositivos de proteção devem ser devidamente coordenados para detectar e eliminar distúrbios em até 150 ms (ANEEL, 2019), (ONS, 2010). Considerando a natureza dos fenômenos, optou-se pela implementação de um janelamento com largura de 5 ciclos, menor que o definido nas normas brasileiras. Se o valor máximo da energia ultrapassar o limiar por mais de 1 janelamento, trata-se do fenômeno CI, caso contrário, corresponde a carga notável.

Considerando a Figura 13, outra ação de monitoramento é observada. Nela, a TF é aplicada a fim de monitorar a DHT e a variação de frequência. Um relatório é enviado quando os valores de DHT e/ou da frequência do sinal operam fora dos limites estabelecidos (conforme foi apresentado no Capítulo 2, Tabelas 1 e 2).

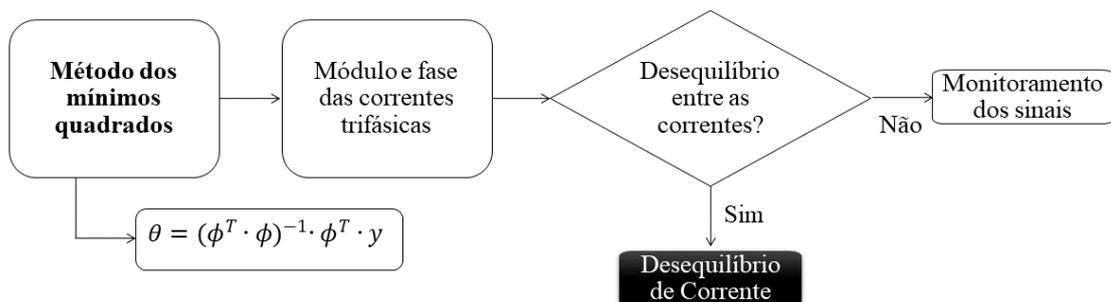
Figura 13 – Processo de classificação: Ações de monitoramento (TF).



Fonte: autoria própria.

Por fim, na Figura 14, a última ação de monitoramento é observada. O MMQ é aplicado com o intuito de monitorar o distúrbio associado ao desequilíbrio de corrente, em janelas de cinco ciclos do sinal. Esse método foi utilizado para estimar fasorialmente os sinais de corrente, obtendo os valores dos módulos e das fases das correntes trifásicas. Mediante a ocorrência de uma defasagem ou diferença de amplitude (fora dos limites estabelecidos) um relatório informativo é emitido.

Figura 14 – Processo de classificação: Ações de monitoramento (MMQ).



Fonte: autoria própria.

5 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos com a aplicação da metodologia apresentada no Capítulo 4. Os testes realizados utilizaram os dados obtidos das simulações computacionais com o *software* ATP e os dados reais fornecidos pela EDP Brasil. Primeiramente são mostrados os resultados para alguns estudos de casos simulados: a identificação ou não da segunda harmônica no fenômeno CI de alta intensidade e nos curtos-circuitos; a classificação dos quatro tipos de curtos-circuitos; a diferenciação entre o fenômeno CI de baixa intensidade e a carga notável e; o monitoramento da distorção harmônica, variação de frequência e desequilíbrio de corrente. Em seguida, algumas oscilografias reais, típicas dos curtos-circuitos fase-terra, fase-fase e de uma falta evolutiva, são analisadas aplicando-se a segmentação de sinais baseada na TWD. Na sequência de cada tópico uma análise qualitativa dos resultados obtidos é realizada.

5.1 AVALIAÇÃO DOS CASOS SIMULADOS

Em suma, as oscilografias passaram por uma reamostragem seguida da decomposição dos sinais por meio da TWD (db4, em seu primeiro ou segundo nível de decomposição), normalização, janelamento e classificação (critérios de diferenciação).

As amostras de corrente no domínio do tempo foram normalizadas pelo valor máximo encontrado nas oscilografias das correntes nas três fases e no neutro em cada janelamento. O processo de janelamento consistiu no agrupamento de 1, 2, 3 ou 4 ciclos consecutivos das correntes. A janela de dados percorre as amostras dos sinais referentes ao intervalo de falta delimitado, deslocando-se ao passo de 128 amostras por vez. Esse processo de janelamento é fundamental, pois permite uma análise da metodologia proposta mais próxima do que ocorre em sistemas reais. Com isso é possível modelar o que ocorre em unidades de monitoramento

presentes na rede como, por exemplo, religadores capazes de medir, registrar e disponibilizar oscilografias em que se observaram distúrbios.

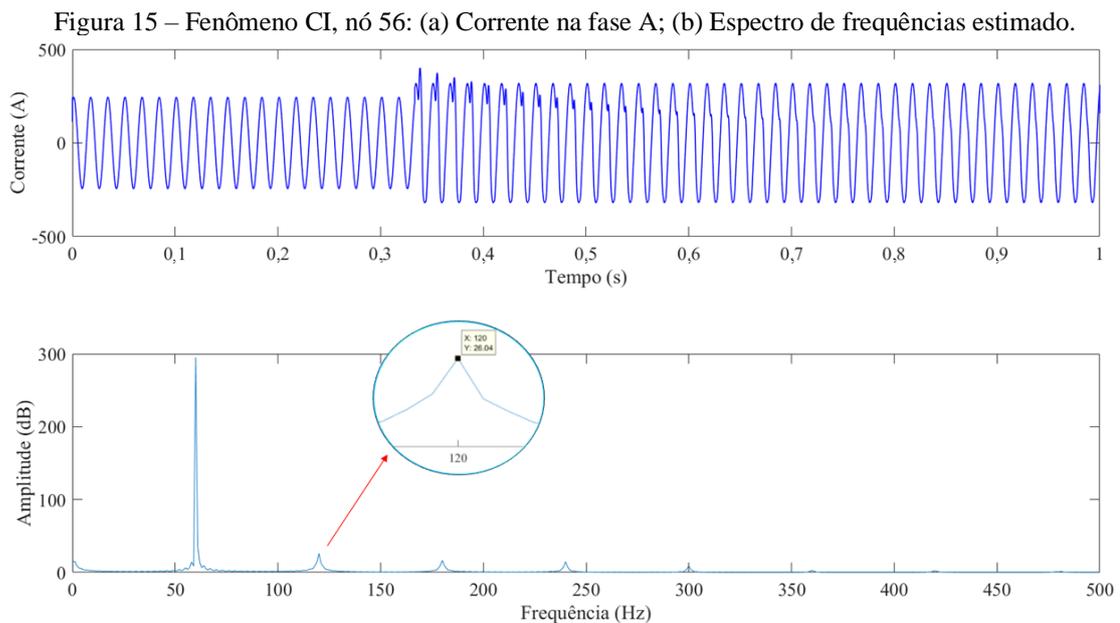
Na etapa de classificação cada janela normalizada foi apresentada aos critérios de diferenciação responsáveis pela identificação do fenômeno correspondente àquelas amostras.

5.1.1 AÇÕES PRIORITÁRIAS: PRESENÇA DA SEGUNDA HARMÔNICA

Com o objetivo de demonstrar a primeira ação da metodologia, os resultados obtidos com a aplicação da TF em sinais característicos do fenômeno CI e de um curto-circuito trifásico são apresentados. A taxa de sucesso obtida nesta etapa foi de 100%.

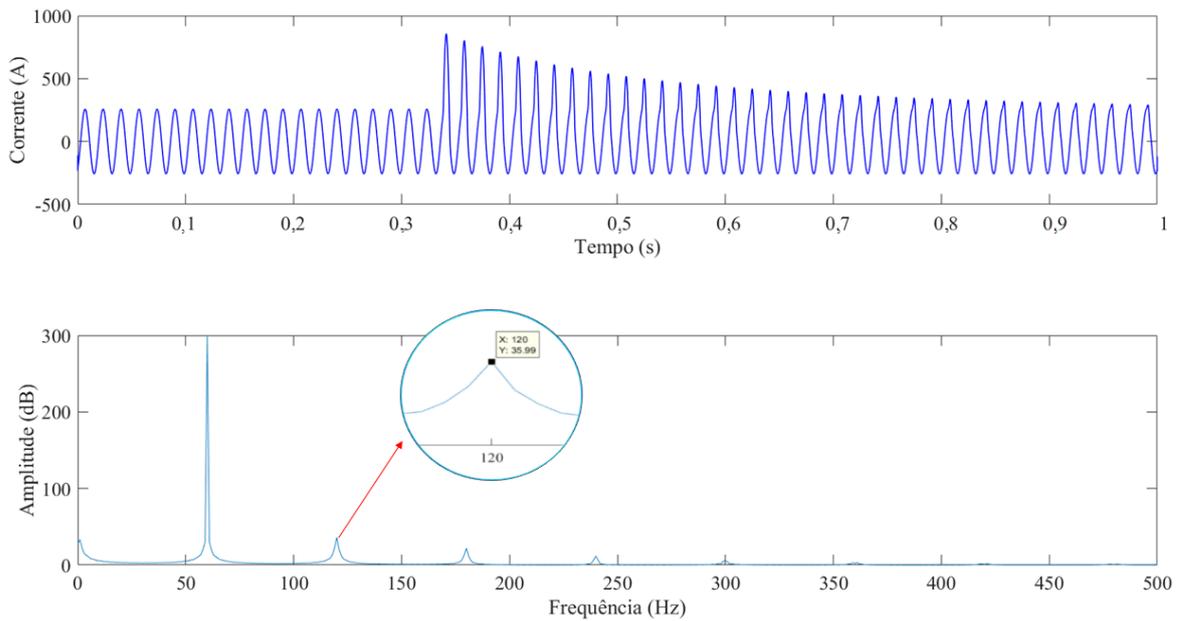
Nas Figuras 15, 16 e 17 o fenômeno CI nas fases A, B e C, respectivamente, são observados quando o transformador foi alocado no nó 56. Nesta simulação o carregamento corresponde a 20% do valor nominal da carga. Esse fenômeno pode ser confundido com um curto-circuito, caso não se aplique um critério de decisão adequado.

Nas Figuras 15 (a), 16 (a) e 17 (a) apresentam-se as correntes nas fases A (*I_a*), B (*I_b*) e C (*I_c*), respectivamente. As variações bruscas entre os instantes sem distúrbio (intervalo de tempo entre 0 s e 0,333 s) e com distúrbio são observadas. Já nas Figuras 15 (b), 16 (b) e 17 (b) apresentam-se as estimativas dos espectros de frequências nos quais a contribuição da 2ª harmônica pode ser observada. Considerando as amplitudes relativas à fundamental, a amplitude da 2ª harmônica corresponde à 8,7%, 12% e 11,6% das correntes *I_a*, *I_b* e *I_c*, nessa ordem, sendo estes valores maiores que o limiar definido no Capítulo 4 (5%).



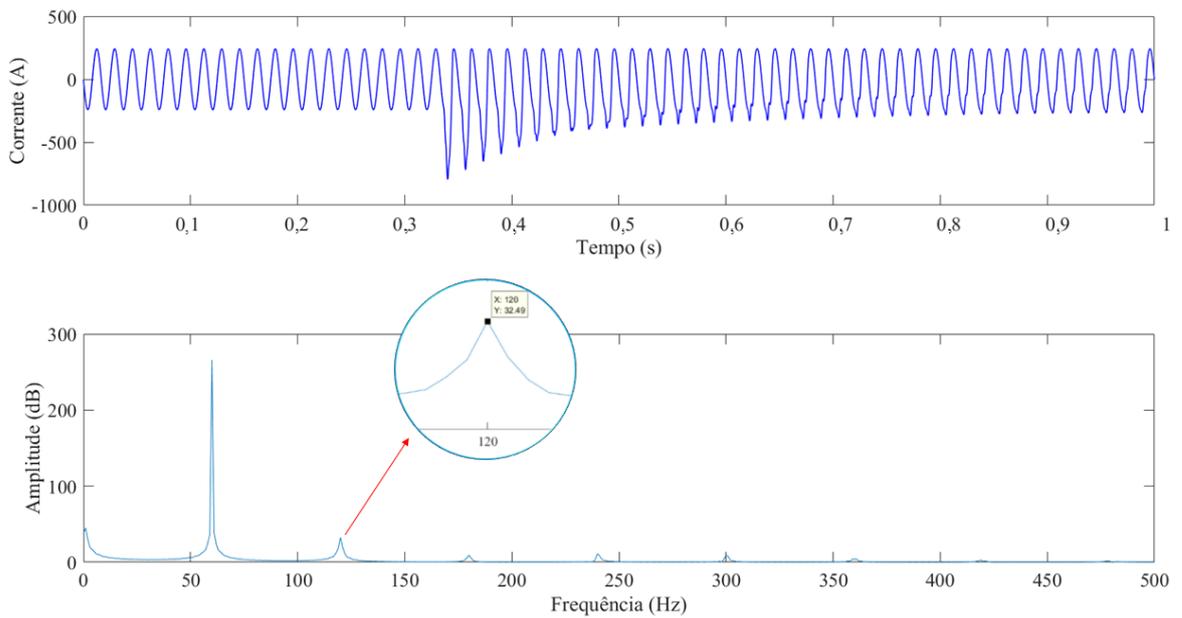
Fonte: autoria própria.

Figura 16 – Fenômeno CI, nó 56: (a) Corrente na fase B; (b) Medida do espectro de Fourier.



Fonte: autoria própria.

Figura 17 – Fenômeno CI, nó 56: (a) Corrente na fase C; (b) Medida do espectro de Fourier.



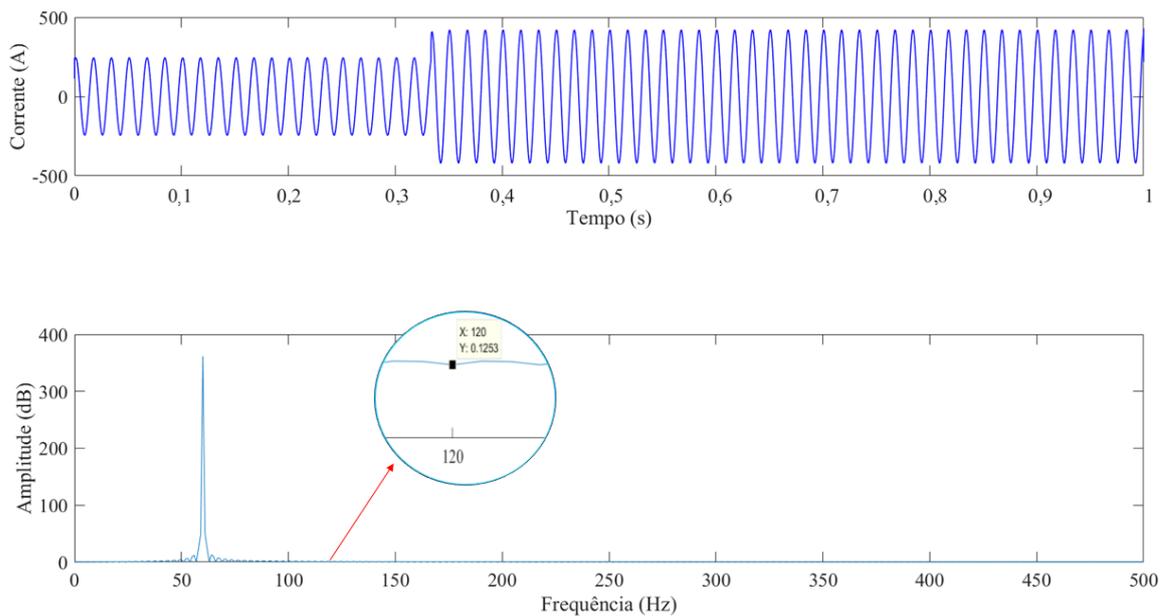
Fonte: autoria própria.

Com base na análise das componentes harmônicas de segunda ordem nas três fases das correntes o algoritmo é capaz de afirmar que o caso descrito anteriormente é caracterizado como CI.

Para verificar os valores da segunda harmônica em curtos-circuitos apresentam-se, nas Figuras 18, 19 e 20, as correntes nas fases A, B e C, respectivamente, registradas na subestação (nó 1) de um curto-circuito trifásico simulado no nó 38 (cujo carregamento é igual a 20%), com ângulo de falta igual a 0° e impedância de falta igual a 50Ω .

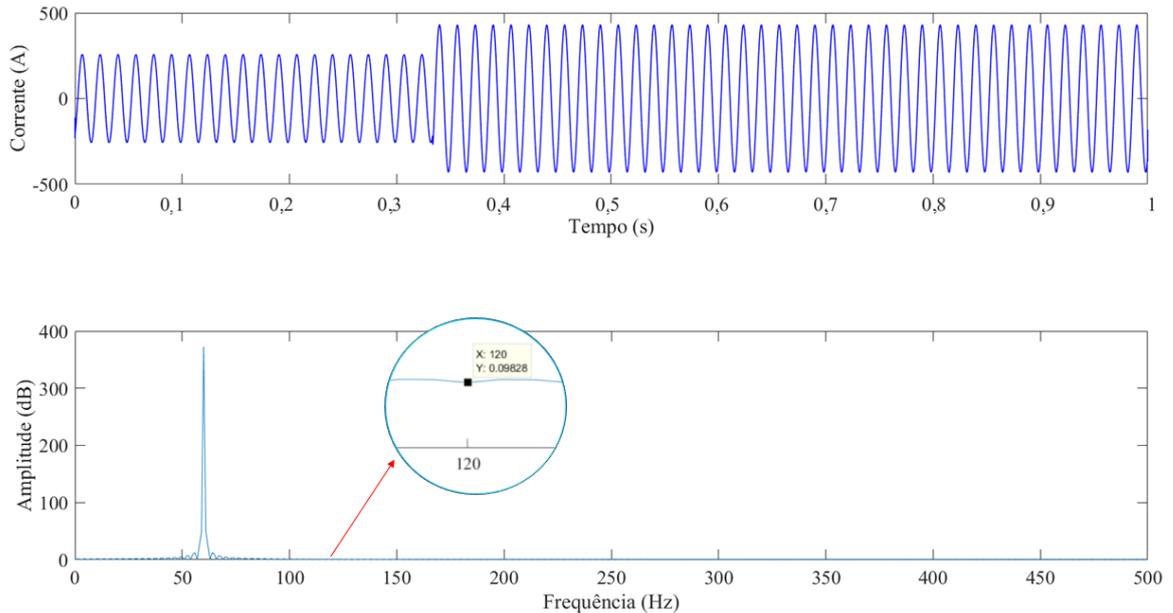
Nas Figuras 18 (a), 19 (a) e 20 (a) observam-se as correntes nas fases A, B e C, nessa ordem. Um aumento na amplitude no instante de falta, em 0,333 s, é verificado em decorrência da presença de transitórios típicos de um curto-circuito. Já nas Figuras 18 (b), 19 (b) e 20 (b) verificam-se as estimativas dos espectros de frequências com a contribuição da 2ª harmônica. É nítido que para esses casos essa componente apresenta valores desprezíveis. Como se esperava, os valores obtidos são próximos a zero e, considerando a amplitude relativa à fundamental, as amplitudes das 2^{as} harmônicas correspondem à 0,034%, 0,026% e 0,011%, para as correntes nas fases A, B e C, respectivamente, sendo muito menores que o valor estabelecido no Capítulo 4. Neste caso, o algoritmo proposto condiciona este caso a uma nova análise, na qual a classificação ocorre considerando os 4 tipos de curto-circuito.

Figura 18 – Curto-circuito trifásico, nó 38: (a) Corrente na fase A; (b) Medida do espectro de Fourier.



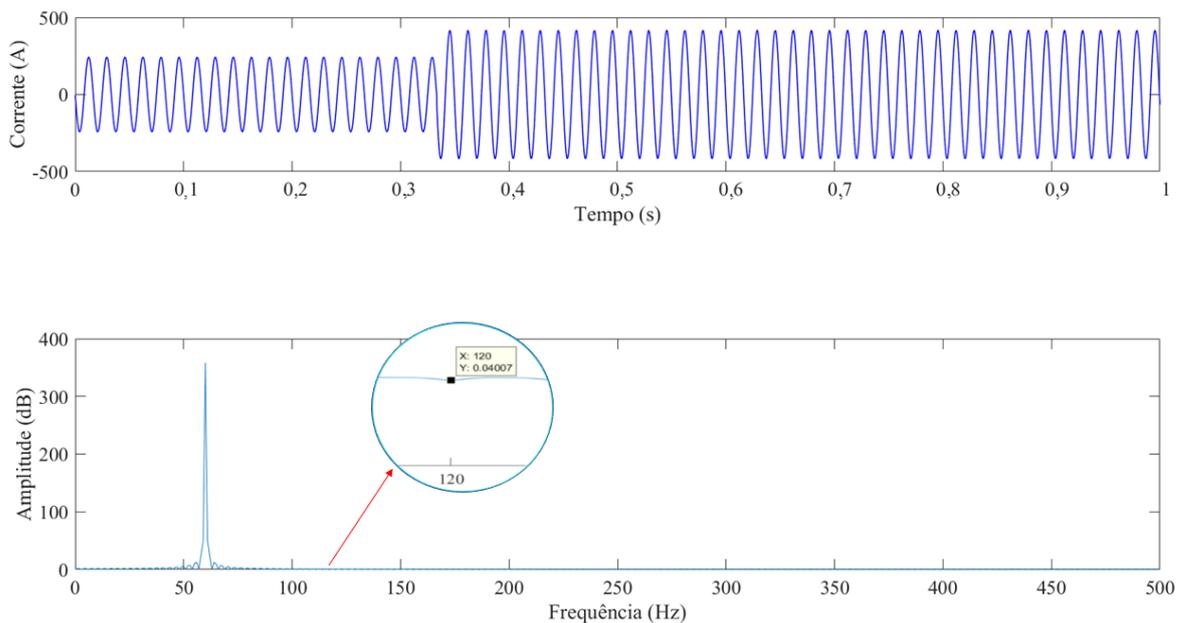
Fonte: autoria própria.

Figura 19 – Curto-circuito trifásico, nó 38: (a) Corrente na fase B; (b) Medida do espectro de Fourier.



Fonte: autoria própria.

Figura 20 – Curto-circuito trifásico, nó 38: (a) Corrente na fase C; (b) Medida do espectro de Fourier.



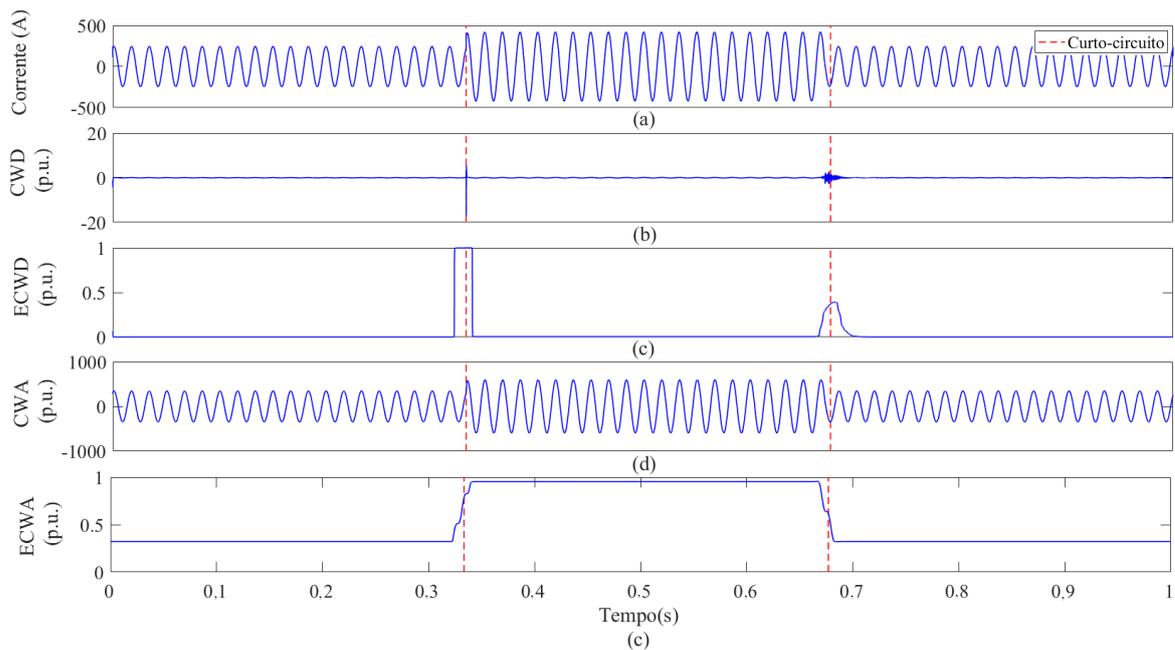
Fonte: autoria própria.

Para os sinais da base de dados, a presença da segunda harmônica é observada como um critério suficientemente capaz de promover a diferenciação entre a ocorrência de uma CI e de um curto-circuito genérico, conforme colocado por (RAHMAN e JEYASURYA, 1988; YABE, 1997). Em todos os casos testados houve sucesso na classificação.

5.1.2 AÇÕES PRIORITÁRIAS: CURTOS-CIRCUITOS

Para ilustrar o comportamento das curvas dos coeficientes *wavelet* e seus respectivos perfis de energia apresentam-se, na Figura 21, os resultados obtidos aplicando-se a metodologia proposta na fase A (*Ia*) de um curto-circuito trifásico simulado no nó 57 (carregamento igual a 20%) e registrado da subestação (nó 1), com ângulo de falta igual a 0° e impedância de falta igual a 50Ω . Apesar da metodologia requerer a observação das três fases simultaneamente, a fim de demonstrar o comportamento das grandezas ao longo da sua execução, são apresentadas as grandezas em uma única fase. Nessa figura representam-se, respectivamente, a forma de onda de corrente na fase A durante um curto-circuito trifásico, seus coeficientes *wavelet* de detalhe (CWD), a energia dos coeficientes *wavelet* de detalhe (ECWD), os coeficientes *wavelet* de aproximação (CWA) e a energia do coeficiente *wavelet* de aproximação (ECWA) aplicando-se a db4 em seu primeiro nível de decomposição.

Figura 21 – Curto-circuito trifásico, nó 57: (a) Corrente na fase A; (b) CWD; (c) ECWD; (d) CWA; (e) ECWA.



Fonte: autoria própria.

As energias dos coeficientes indicam (Figura 21 (c) e (e)), com boa exatidão, o instante inicial, em 0,333 s e o instante final, em 0,666 s, do curto-circuito (linhas tracejadas vermelhas). No entanto, a ECWA mantém-se elevada em toda a duração do fenômeno e, considerando as condições impostas, constata-se que esse parâmetro é o mais adequado para compor os critérios de diferenciação dos curtos-circuitos, afinal, a amplitude se mantém constante e próxima a 1 p.u. durante toda a ocorrência do curto-circuito, até que, em 0,666 s, o sistema retorna as

condições normais de funcionamento. Devido à normalização aplicada, as características da ECWA tornam-se genéricas a todos os casos da base de dados simulada.

Nos subtópicos seguintes são avaliadas as oscilografias de cada tipo de curto-circuito com a aplicação da db4 em seu primeiro nível de decomposição. A linha tracejada vermelha, em todos os gráficos, indica o instante em que o curto-circuito ocorreu. É a partir deste instante que o algoritmo proposto atua.

Os critérios de diferenciação implementados foram capazes de promover a classificação em toda base de dados simulada. Com base nos testes realizados para todos os casos de curto-circuito e nas taxas de sucesso obtidas adotou-se um limiar λ com valor igual a 0,8 e um limiar k definido em 0,00001 p.u. para a avaliação de In . Esses limiares são determinados a partir de sucessivos testes e validações baseados nas especificações do SEP, dos transformadores de potência e do desempenho dos equipamentos de proteção. Apesar de dependerem da topologia da rede, também foram capazes de promover a classificação correta dos casos reais. Futuramente, pretende-se tornar esses limiares adaptativos.

Uma taxa de sucesso de 100% foi obtida, conforme Tabela 7, na classificação para todo o conjunto de oscilografias. Essa taxa decorre da avaliação dos perfis de energia durante um janelamento de 16,66 ms, isto é, 1 ciclo. Assim, para os demais janelamentos, o comportamento foi idêntico.

Tabela 7 – Taxas de sucesso obtidas para a base de dados de curtos-circuitos simulados.

Curtos-circuitos	Oscilografias	Classificação de curtos-circuitos			
		Janelamento (número de ciclos)			
		1	2	3	4
Fase-terra A	10	100%	100%	100%	100%
Fase-terra B	10	100%	100%	100%	100%
Fase-terra C	10	100%	100%	100%	100%
Fase-fase AB	10	100%	100%	100%	100%
Fase-fase AC	10	100%	100%	100%	100%
Fase-fase BC	10	100%	100%	100%	100%
Fase-fase-terra AB	10	100%	100%	100%	100%
Fase-fase-terra AC	10	100%	100%	100%	100%
Fase-fase-terra BC	10	100%	100%	100%	100%
Trifásico	30	100%	100%	100%	100%
TOTAL	120	100%	100%	100%	100%

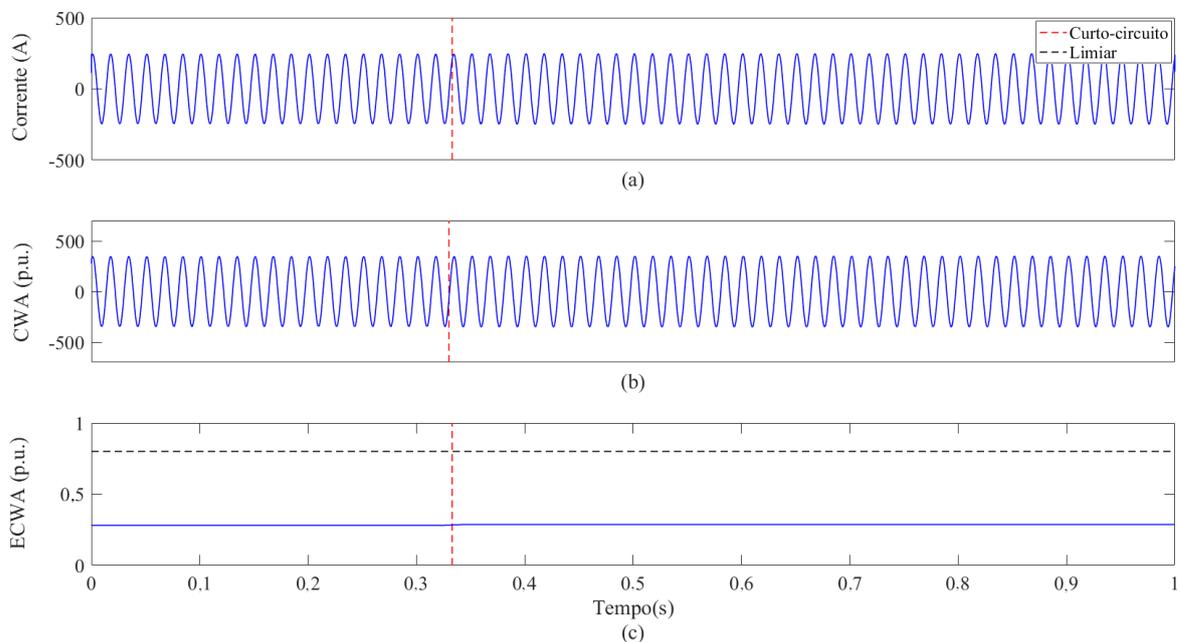
Fonte: autoria própria.

5.1.2.1 CURTO-CIRCUITO FASE-TERRA

As Figuras 22, 23 e 24 são utilizadas para exemplificar o comportamento de um curto-circuito fase-terra B simulado no nó 3 (carregamento igual a 20%) e registrado na subestação (nó 1) com ângulo de falta igual a 0° (indica o ângulo de inserção da falta que pode variar de um valor mínimo, forma de onda passando por zero, até um valor máximo, forma de onda passando por um máximo a 90°) e impedância de falta igual a 50Ω (variada em 0,1, 50 e 100 Ω para respeitar a natureza dos fenômenos, isto é, faltas com impedâncias baixas).

Na Figura 22 (a) a corrente na fase A é apresentada no seu período de pré-falta e falta. Na Figura 22 (b) observa-se o CWA. Verifica-se que em 0,333 s não há alterações consideráveis da amplitude do coeficiente. Na Figura 22 (c) é possível identificar o parâmetro de energia extraído do CWA, bem como, o limiar λ adotado (linha tracejada preta). Verifica-se que o valor da ECWA permanecer menor que λ ($ECWA_{Ia} < \lambda$) durante todo intervalo de tempo entre 0,333 s e 1 s e, com base nos critérios de diferenciação, o algoritmo é capaz de emitir um relatório que afirma que não existe assinatura de curto-circuito nesta fase. O valor máximo obtido de ECWA é de 0,2867 p.u.

Figura 22 Curto-circuito fase-terra B, nó 3: (a) Corrente na fase A; (b) CWA; (c) ECWA.

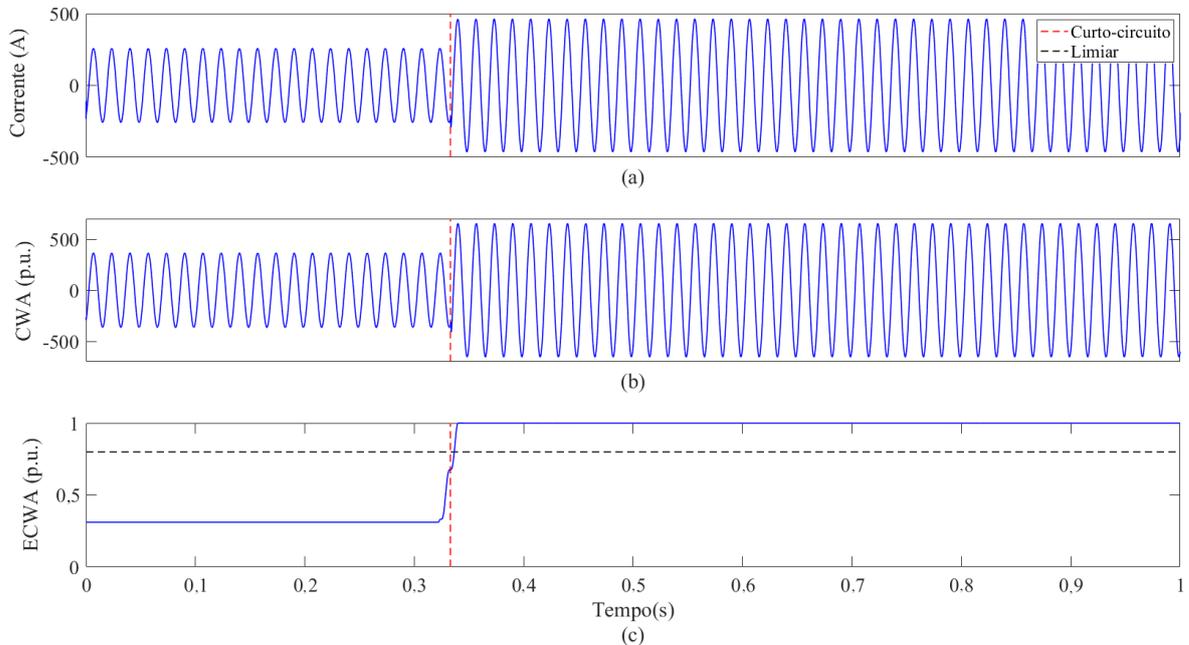


Fonte: autoria própria.

Na Figura 23 (a), a corrente na fase B (I_b) do curto-circuito fase-terra B é observada. Na Figura 23 (b) verifica-se o CWA que, no instante de ocorrência do fenômeno, aumenta consideravelmente. Na Figura 23 (c) o parâmetro de energia extraído do CWA e o limiar λ

(linha tracejada preta) são observados. Apesar do valor da ECWA permanecer maior que λ ($ECWA_{Ib} > \lambda$) durante todo intervalo de tempo entre 0,333 s e 1 s, apenas as informações do janelamento de 1 ciclo já são suficientes para se afirmar que há assinatura de curto-circuito nesta fase.

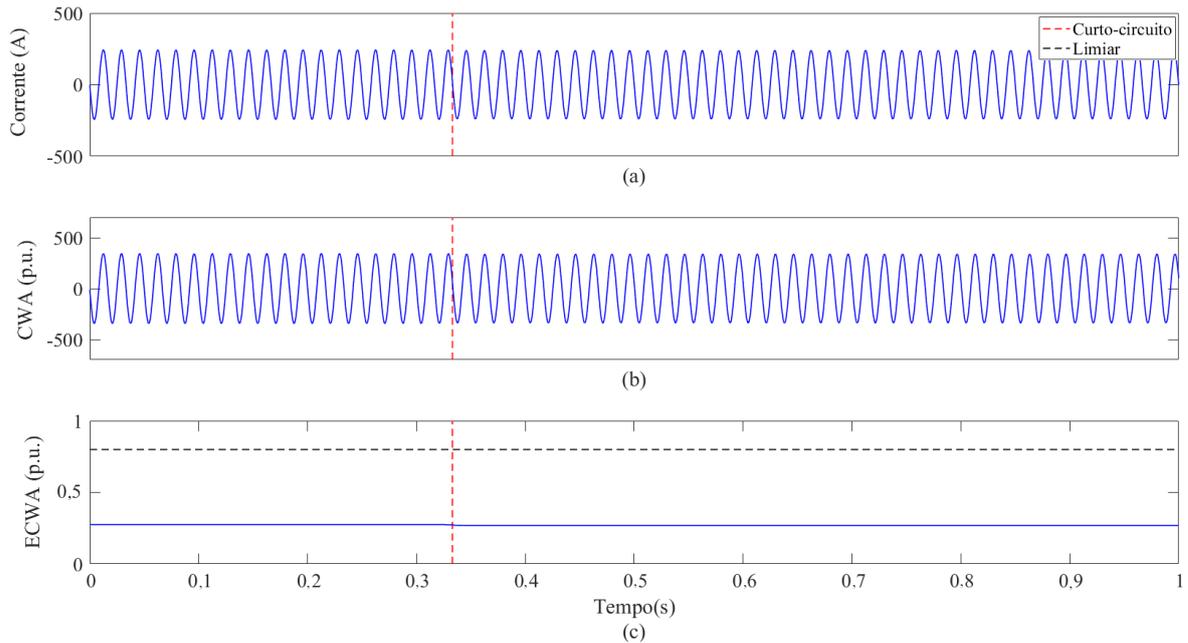
Figura 23 – Curto-circuito fase-terra B, nó 3: (a) Corrente na fase B; (b) CWA; (c) ECWA.



Fonte: autoria própria.

Na Figura 24 (a), o sinal da corrente na fase C (I_c) do mesmo curto-circuito é observado. Na Figura 24 (b) o CWA da corrente I_c é observado. Já na Figura 24 (c), o comportamento da ECWA avaliado no módulo de classificação é analisado. Neste caso, nota-se que a ECWA se mantém próxima a zero. Com base nos critérios de diferenciação o algoritmo é capaz identificar a não assinatura de curto-circuito nesta fase. No intervalo entre 0,333 e 1 s o valor máximo obtido para ECWA é de 0,2684 p.u.

Figura 24 – Curto-circuito fase-terra B, nó 3: (a) Corrente na fase C; (b) CWA; (c) ECWA.



Fonte: autoria própria.

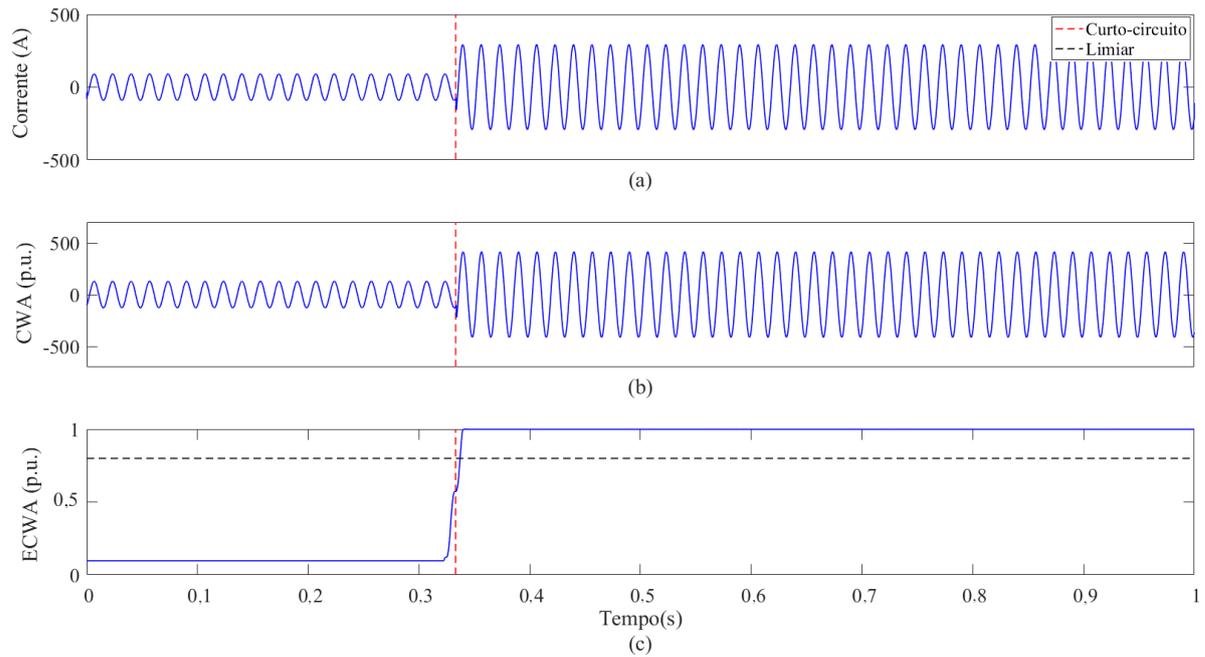
Tratando-se de uma metodologia que avalia simultaneamente as correntes trifásicas, o distúrbio foi classificado corretamente como curto-circuito fase-terra B.

5.1.2.2 CURTO-CIRCUITO FASE-FASE-TERRA

Nota-se, nas Figuras 25, 26 e 27, as correntes das fases A, B e C, respectivamente, registradas na subestação (nó 1) de um curto-circuito fase-fase-terra AB simulado no nó 56 (cujo carregamento é igual a 60%), com ângulo de falta igual a 0° e impedância de falta igual a 50Ω .

Na Figura 25 (a) a corrente na fase A é apresentada. Na Figura 25 (b) os valores do CWA filtrado são observados. Verifica-se que no instante de ocorrência do fenômeno, em 0,333 s, há um aumento considerável de sua amplitude. Da mesma maneira, na Figura 25 (c) o valor correspondente de energia desse parâmetro, a ECWA, é observado. Constata-se que o limiar λ adotado (linha tracejada preta) é ultrapassado no instante de ocorrência do fenômeno e permanece assim até o final da simulação. Um janelamento de 1 ciclo é suficiente para que se afirme com exatidão que há assinatura de curto-circuito nesta fase.

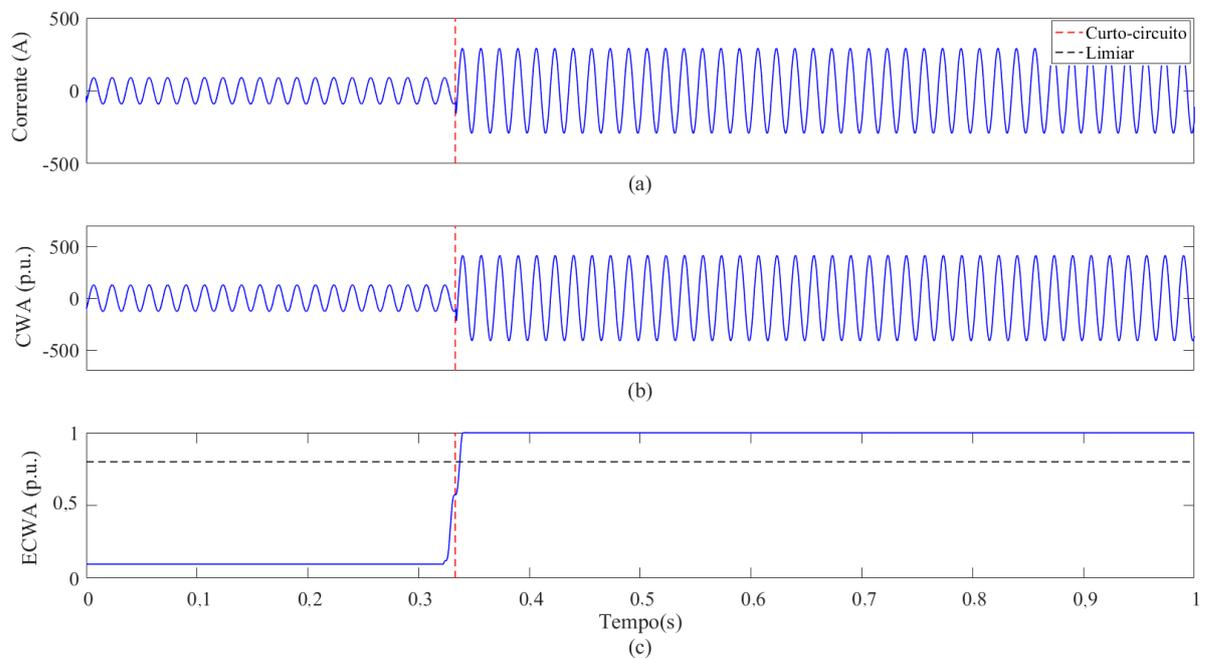
Figura 25 – Curto-circuito fase-fase-terra AB, nó 56: (a) Corrente na fase A; (b) CWA; (c) ECWA.



Fonte: autoria própria.

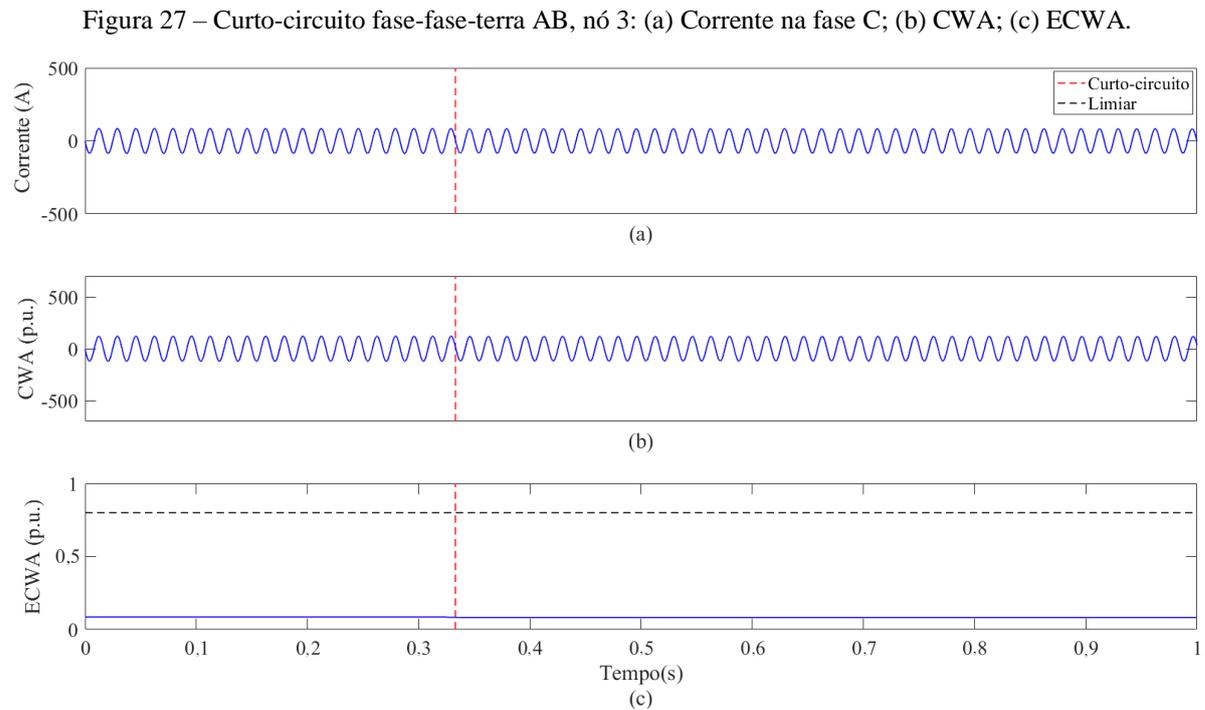
Na Figura 26 (a), a corrente na fase B é observada. Na Figura 26 (b) e (c) o CWA filtrado e a ECWA são apresentados, respectivamente. O comportamento descrito anteriormente, para a fase A, repete-se e, por isso, verifica-se que há assinatura do curto-circuito nesta fase.

Figura 26 – Curto-circuito fase-fase-terra AB, nó 3: (a) Corrente na fase B; (b) CWA; (c) ECWA.



Fonte: autoria própria.

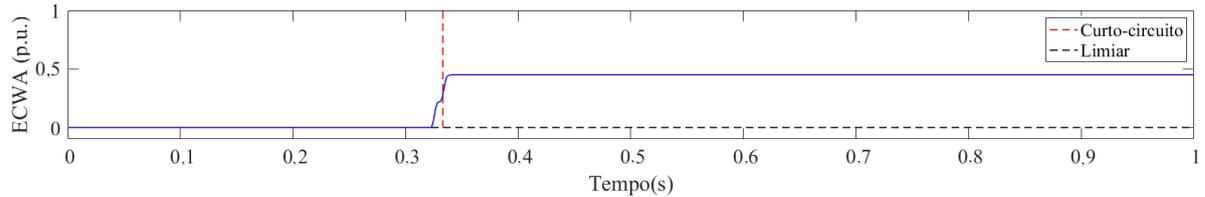
Na Figura 27 (a), nota-se a corrente na fase C (I_c) do mesmo curto-circuito fase-fase-terra AB. Na Figura 27 (b) o CWA da corrente I_b é apresentado e na Figura 27 (c) o perfil de energia correspondente, ECWA, foi extraído. Verifica-se que a ECWA se mantém próxima a zero ($ECWA_{I_c} < \lambda$) no intervalo de falta correspondente. Com base nos critérios de diferenciação constata-se que não há assinatura do curto-circuito nesta fase. No intervalo entre 0,333 e 1 s o valor máximo obtido para ECWA é de 0,0821 p.u.



Fonte: autoria própria.

A fim de detectar o envolvimento da terra nas faltas, a ECWA também foi extraída da I_n e normalizada pelo valor máximo dos perfis de energia de I_a , I_b , I_c e I_n . Assim, para que fosse possível diferenciar a ocorrência de um curto-circuito fase-fase do fase-fase-terra, o limiar k foi avaliado. Admite-se que se a energia for maior que k ($ECWA_{I_n} > k$) a falta é fase-fase-terra, caso contrário, $ECWA_{I_n} \leq k$, a falta é fase-fase. No fenômeno avaliado anteriormente, o valor de ECWA ultrapassou o valor de k (linha tracejada preta), conforme Figura 28, em 0,333 s (linha tracejada vermelha), por isso, o envolvimento da terra na falta foi constatado. Com base na análise simultânea das correntes é possível classificar esse curto-circuito como fase-fase-terra AB.

Figura 28 – ECWA obtida da corrente de neutro de um processamento de um curto-circuito fase-fase-terra AB, nó 3.



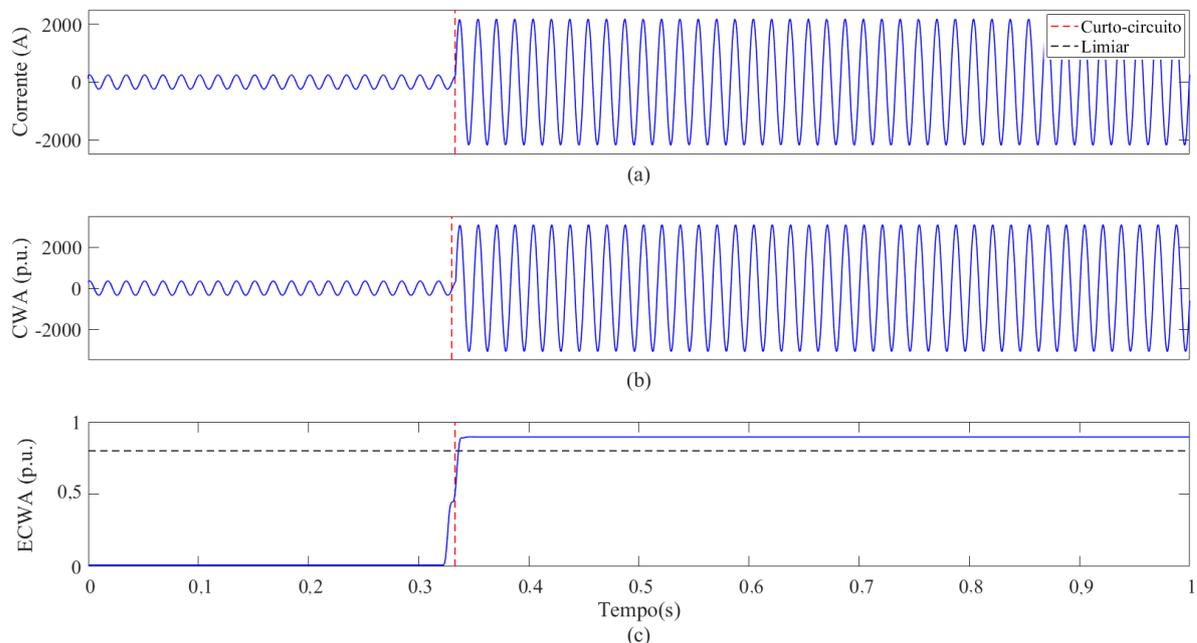
Fonte: autoria própria.

5.1.2.3 CURTO-CIRCUITO FASE-FASE

Nas Figuras 29, 30 e 31 apresentam-se as correntes trifásicas registradas na subestação (nó 1) de um curto-circuito fase-fase AC simulado no nó 34 (com carregamento total), com ângulo de falta igual a 0° e impedância de falta igual a 50Ω .

Na Figura 29 (a) a corrente na fase A é apresentada. Na Figura 29 (b) e (c) apresentam-se, nessa ordem, os valores de CWA e ECWA. No instante de ocorrência do fenômeno, em 0,333 s, há um aumento considerável da amplitude dos dois parâmetros. Analisando-se a ECWA é possível avaliar o limiar λ adotado (linha tracejada preta) no instante de ocorrência do fenômeno a energia ultrapassa esse limiar e permanece assim até o final da simulação.

Figura 29 – Curto-circuito fase-fase AC, nó 34: (a) Corrente na fase A; (b) CWA; (c) ECWA.

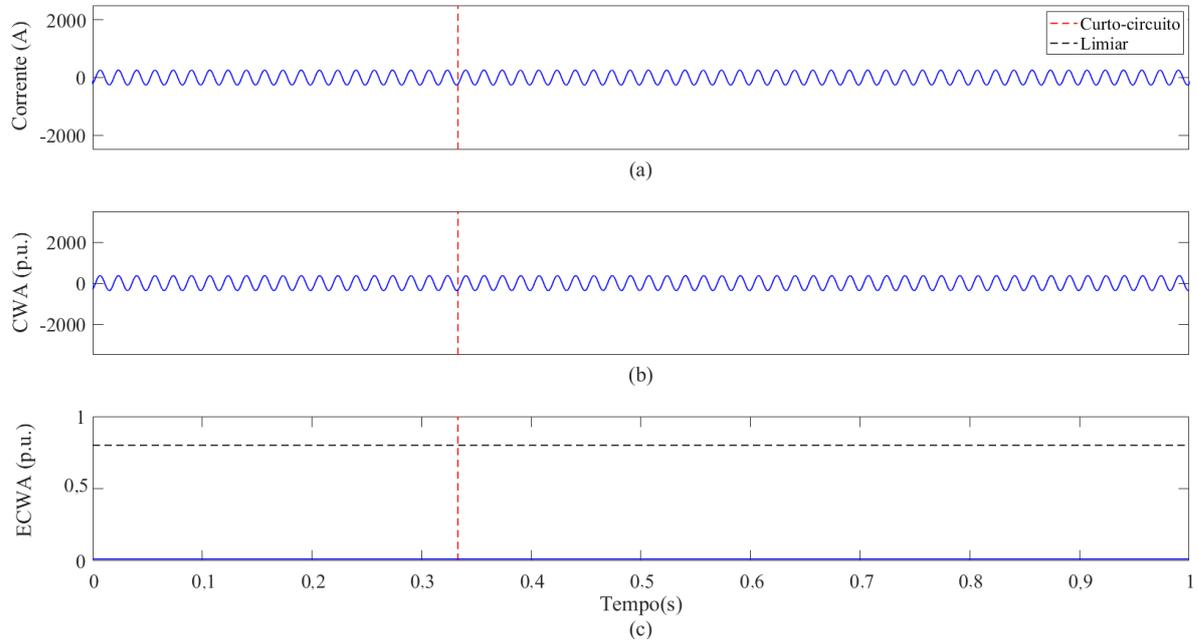


Fonte: autoria própria.

Na Figura 30 (a), nota-se a corrente na fase B. Na Figura 30 (b) e (c) o CWA filtrado e o respectivo perfil de energia, ECWA, são apresentados, respectivamente. A ECWA se mantém

próxima a zero ($ECWA_{Ib} < \lambda$) no intervalo entre 0,333 s e 1 s. Com base nos critérios de diferenciação verifica-se que não há assinatura do curto-circuito nesta fase. No intervalo entre 0,333 e 1 s o valor máximo obtido para ECWA é de 0,01256 p.u.

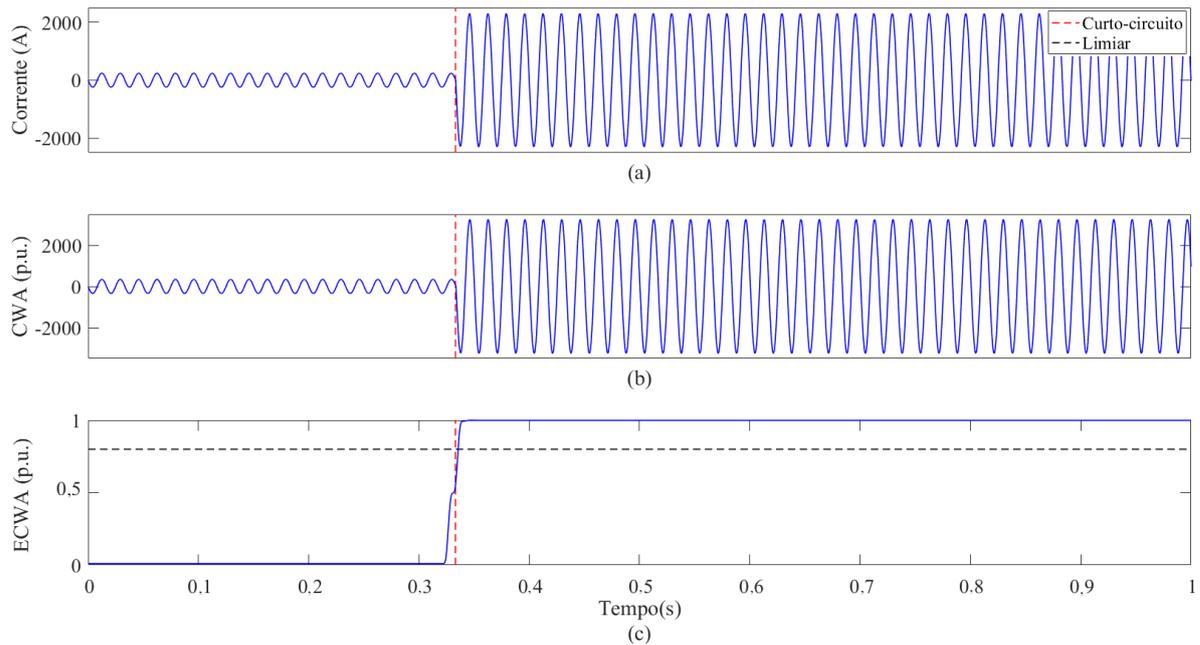
Figura 30 – Curto-circuito fase-fase AC, nó 34: (a) Corrente na fase B; (b) CWA; (c) ECWA.



Fonte: autoria própria.

Na Figura 31 (a), nota-se o sinal da corrente na fase C da mesma falta. Na Figura 31 (b) o CWA da corrente é apresentado e na Figura 31 (c) o perfil de energia correspondente, ECWA, foi extraído. Uma assinatura da falta decorrido os 0,333 s (linha tracejada vermelha) até o final da simulação é verificada. O parâmetro ECWA permanece com amplitudes próximas a 1 durante a ocorrência da falta. Seguindo os critérios de diferenciação, a metodologia proposta é capaz de indicar que nesta fase há assinatura de um curto-circuito.

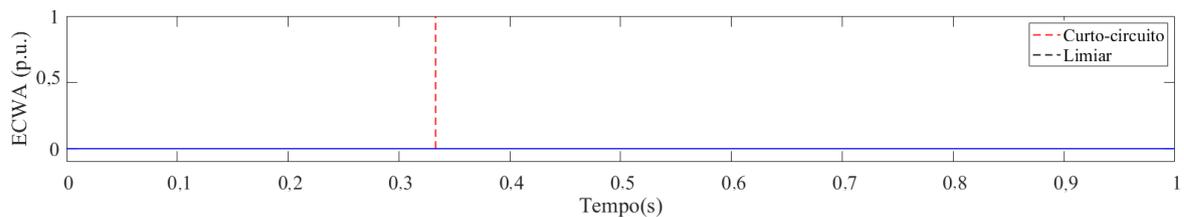
Figura 31 – Curto-circuito fase-fase AC, nó 34: (a) Corrente na fase C; (b) CWA; (c) ECWA.



Fonte: autoria própria.

Para verificar se há ou não o envolvimento da terra nesta falta, a ECWA também foi extraída da corrente I_n e normalizada pelo valor máximo dos perfis de energia de I_a , I_b , I_c e I_n em cada janelamento, conforme apresentado na Figura 32. Constata-se que o valor da energia é menor que o limiar k ($ECWA_{I_n} \leq k$), por isso o curto-circuito é classificado como fase-fase AC, sem o envolvimento da terra. Durante o intervalo delimitado pela linha tracejada vermelha o valor máximo obtido de ECWA é igual a $2,588 \cdot 10^{-10}$ p.u.

Figura 32 – ECWA obtida da corrente de neutro de um processamento de um curto-circuito fase-fase AC, nó 34.



Fonte: autoria própria.

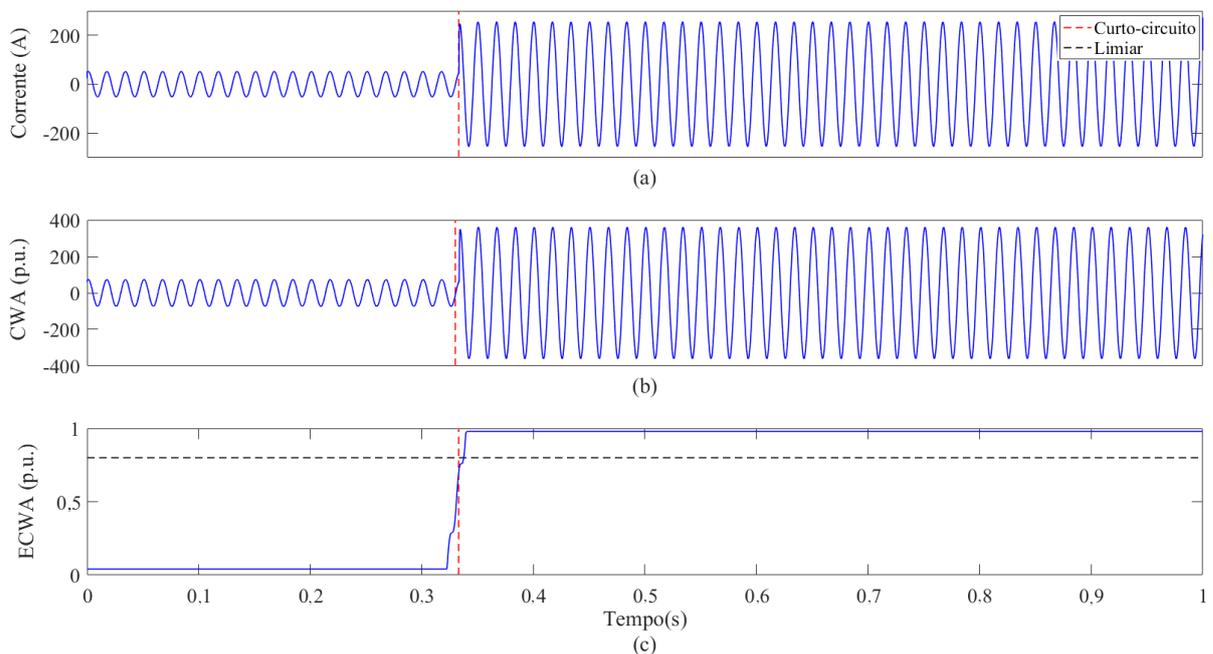
5.1.2.4 CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO

Nas Figuras 33, 34 e 35, observam-se as correntes da fase A, B e C, respectivamente, registradas na subestação (nó 1) de um curto-circuito trifásico simulado no nó 2 (cuja carga é

igual a 100% do carregamento total), com ângulo de falta igual a 0° e impedância de falta igual a 50Ω , bem como, os resultados obtidos com a aplicação do algoritmo proposto.

Na Figura 33 (a) a corrente na fase A é apresentada no seu período de pré-falta e falta. Na Figura 33 (b) e (c) observam-se o CWA filtrado e a ECWA, nessa ordem. Em 0,333 s, há um aumento considerável da amplitude de ambos os parâmetros. O limiar λ (linha tracejada preta) é ultrapassado durante todo intervalo da falta ($ECWA_{Ia} > \lambda$). No entanto, apenas as informações do janelamento de 1 ciclo já são suficientes para se afirmar que há assinatura de curto-circuito nesta fase.

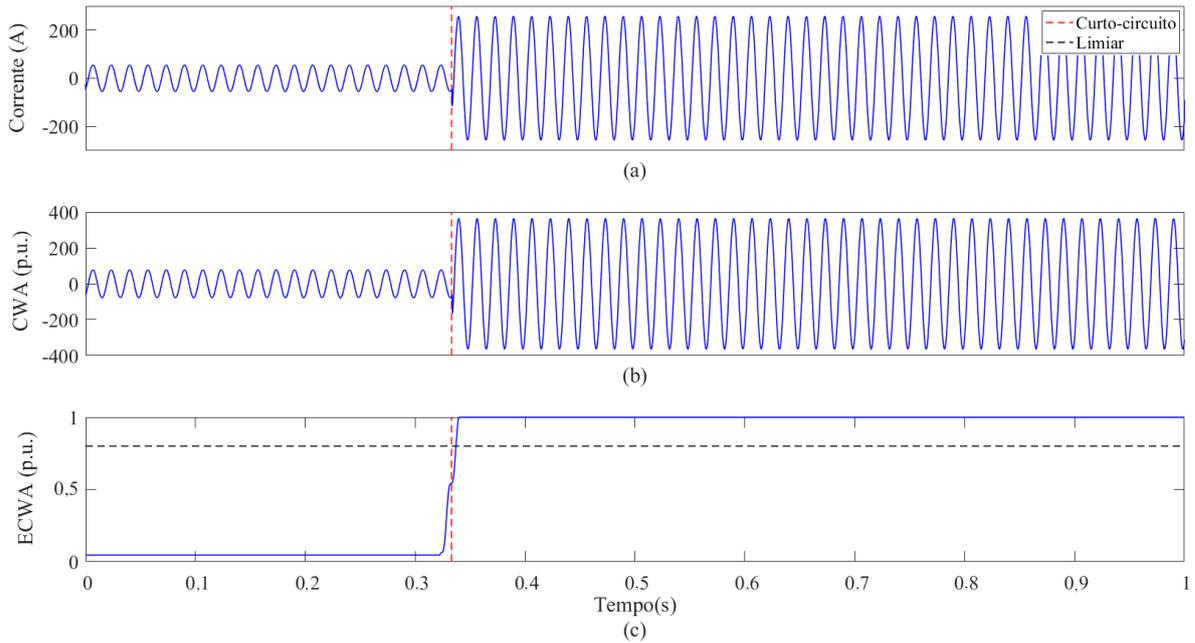
Figura 33 – Curto-circuito trifásico, nó 2: (a) Corrente na fase A; (b) CWA; (c) ECWA.



Fonte: autoria própria.

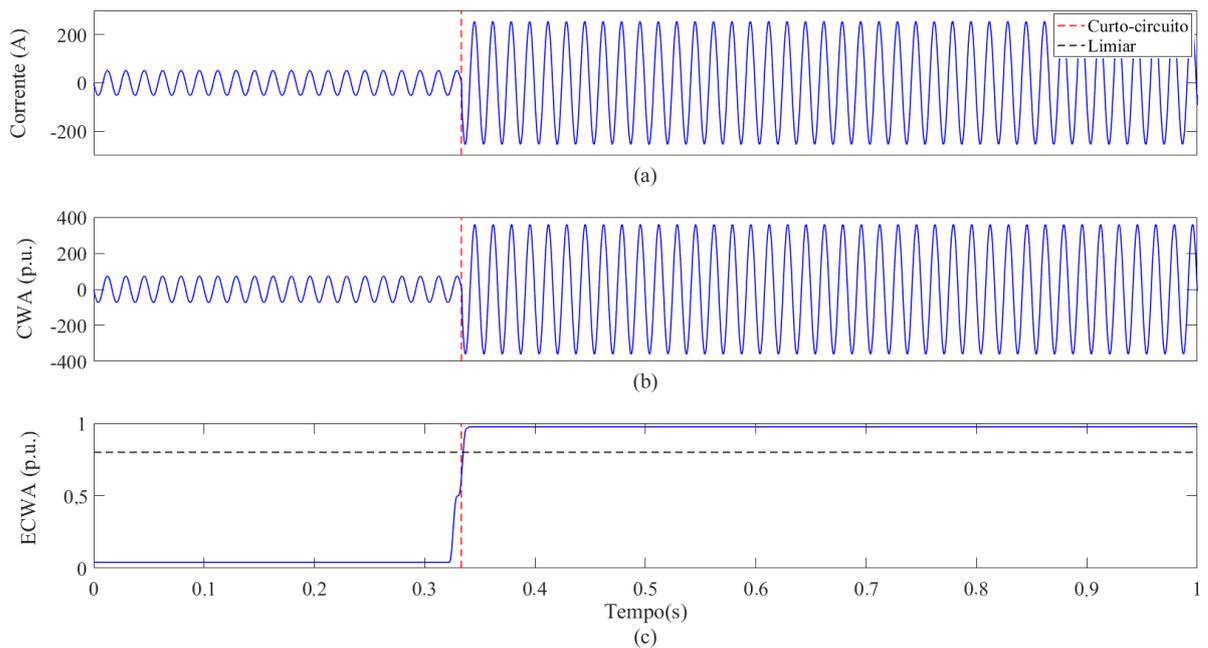
Nas Figuras 34 e 35, o comportamento descrito anteriormente se repete quando se aplicou a metodologia proposta nas fases B e C da corrente. Os perfis de energia, ECWA apresentam amplitudes maiores que o limiar λ proposto, $ECWA_{Ib} > \lambda$ e $ECWA_{Ic} > \lambda$, durante o intervalo de ocorrência da falta.

Figura 34 – Curto-circuito trifásico, nó 2: (a) Corrente na fase B; (b) CWA; (c) ECWA.



Fonte: autoria própria.

Figura 35 – Curto-circuito trifásico, nó 2: (a) Corrente na fase C; (b) CWA; (c) ECWA.



Fonte: autoria própria.

Tratando-se de uma metodologia capaz de avaliar simultaneamente as três fases da corrente e seus respectivos perfis de energia, em uma janela temporal restrita, o relatório emitido atribui a esse caso o *status* de curto-circuito trifásico.

5.1.3 AÇÕES DE MONITORAMENTO: CORRENTE DE *INRUSH* E CARGA NOTÁVEL

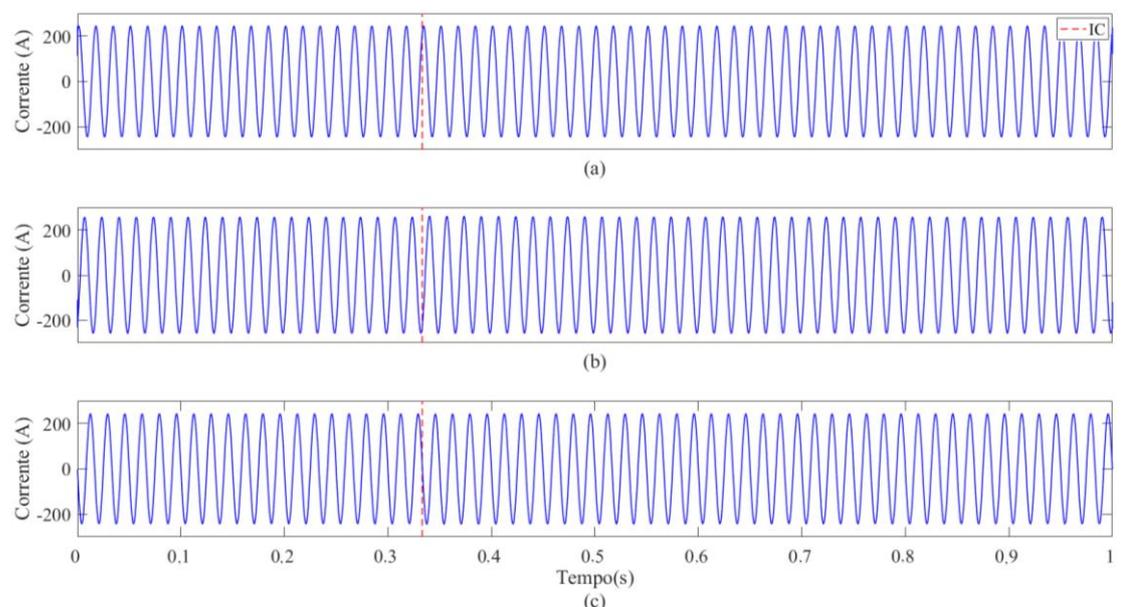
A seguir, os resultados são apresentados com a aplicação da db4, em seu segundo nível de decomposição. Os respectivos coeficientes *wavelet* de detalhe e as energias extraídas são apresentados para demonstrar a viabilidade da ação de monitoramento. A partir dos valores máximos de energia é possível diferenciar a ocorrência da CI de intensidade baixa do fenômeno de carga notável em tempo real. O janelamento proposto foi de 5 ciclos, com um passo de meio ciclo por vez, para reportar com clareza as informações. Para janelamentos entre 2 e 5 ciclos, os resultados são análogos.

Variações do algoritmo tratado em (RASOULPOOR e BANEJAD, 2013) foram simuladas para a definição do limiar da energia β .

A metodologia proposta neste trabalho é aplicada em todas as fases da corrente, no entanto, a taxa de sucesso durante a classificação depende apenas da detecção correta em uma das fases, sendo isso suficiente para caracterizar a ocorrência dos fenômenos. Por esse motivo, nesta seção a análise detalhada dentro de cada janelamento será demonstrada nas fases das correntes em que o fenômeno é mais pronunciado.

Na Figura 36 (a), (b) e (c) ilustra-se o caso da CI nas fases A, B e C das correntes, respectivamente, quando o transformador foi alocado no nó 17. Nesta simulação o carregamento corresponde a 100% do valor nominal da carga. A linha tracejada vermelha indica, em todos os gráficos, o instante de ocorrência do fenômeno em 0,333 s.

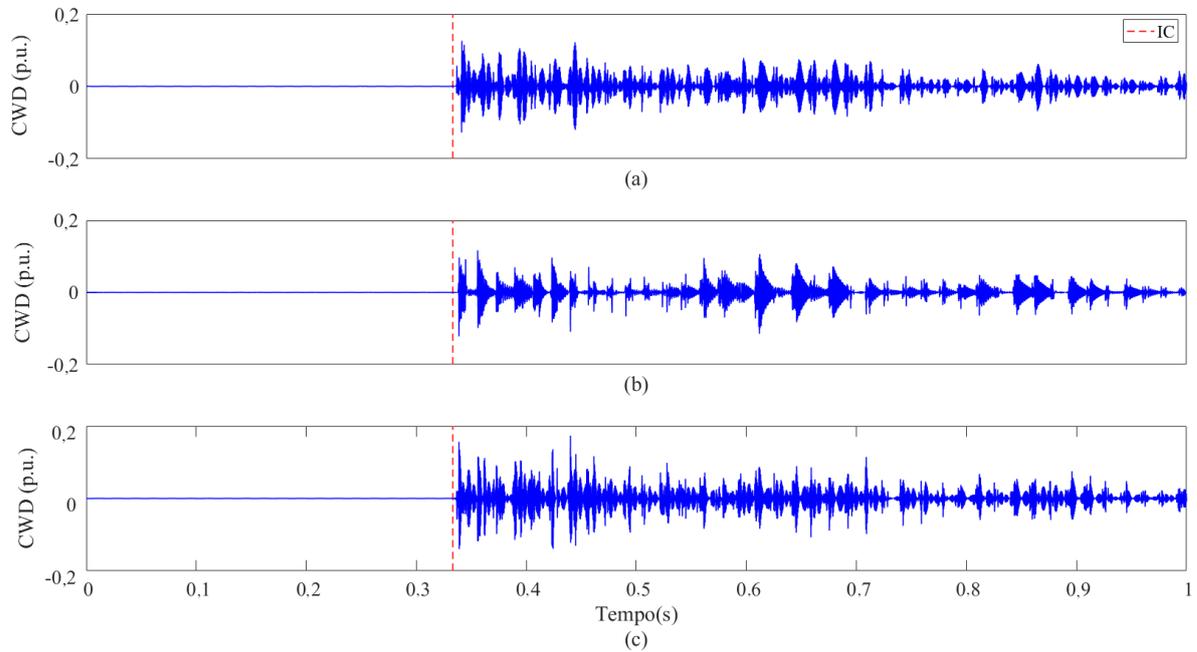
Figura 36 – Fenômeno CI, nó 17: (a) Corrente na fase A; (b) Corrente na fase B; (c) Corrente na fase C.



Fonte: autoria própria.

Observa-se, na Figura 37 (a), (b) e (c) os CWD extraídos das fases A, B e C, nessa ordem. No instante de ocorrência do fenômeno (em 0,333 s), esses coeficientes apresentam um aumento significativo de sua amplitude.

Figura 37 – Fenômeno CI, nó 17: (a) CWD na fase A; (b) CWD na fase B; (c) CWD na fase C.

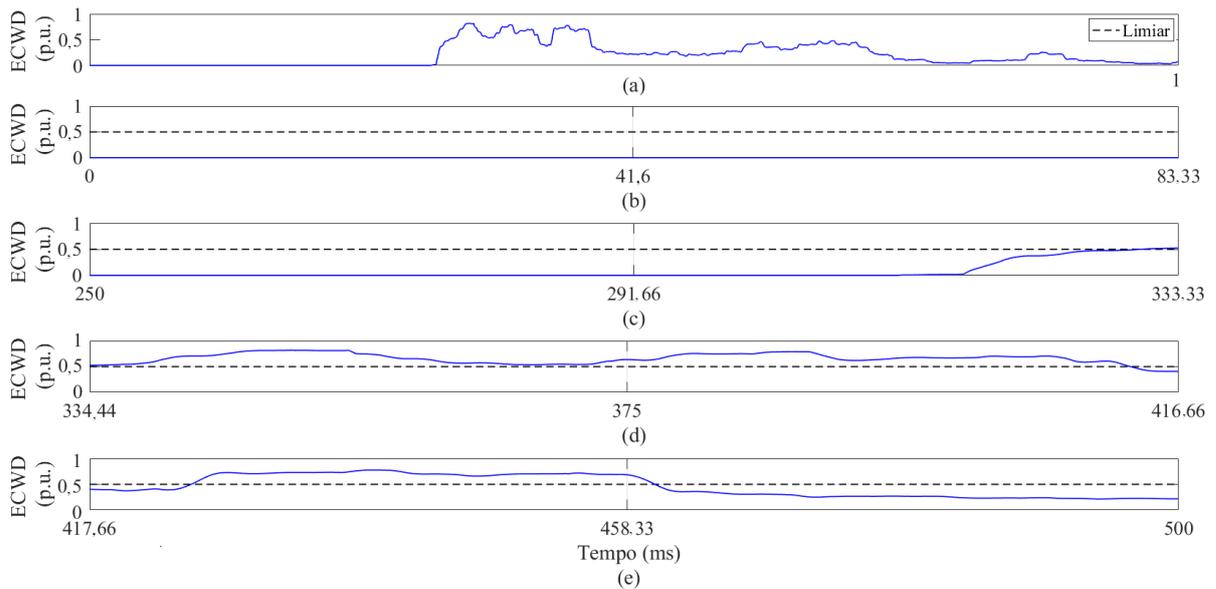


Fonte: autoria própria.

Na Figura 38 (a), a ECWD, extraída do CWD da fase A, é mostrada durante toda a duração do sinal transitório. Nas Figuras 38 (b) a (e), os gráficos desse fenômeno são observados em janelas de tempo menores. Na Figura 38 (b) o evento antes da ocorrência do CI (0 ms a 83,33 ms) é apresentado. O limiar (linha tracejada preta) não é ultrapassado.

Na Figura 38 (c) são apresentados os resultados, quando há o cruzamento entre o limiar de energia β estabelecido e a primeira amostra obtida durante o CI (250 ms a 333,33 ms). Considerando a Figura 38 (d), observa-se que a ECWD apresenta valores máximos que ultrapassam β durante toda a janela correspondente a 334,44 ms a 416,66 ms, ou seja, dos primeiros ciclos após o CI início. Da mesma maneira, durante o janelamento seguinte, Figura 38 (e), observa-se naturalmente a ocorrência da CI ($ECWD_{Ia} > \beta$). Como esse comportamento se repete por mais de 1 janelamento, afirma-se que a classificação da assinatura do CI a partir da ECWD é bem-sucedida.

Figura 38 – Fenômeno CI, nó 17, na fase A: (a) Sinal completo da ECWD; (b) Vinte e cinco ciclos antes da CI; (c) 1ª amostra com CI; (d) Primeiros ciclos após o início da CI, (e) Cinco ciclo após o início da CI.

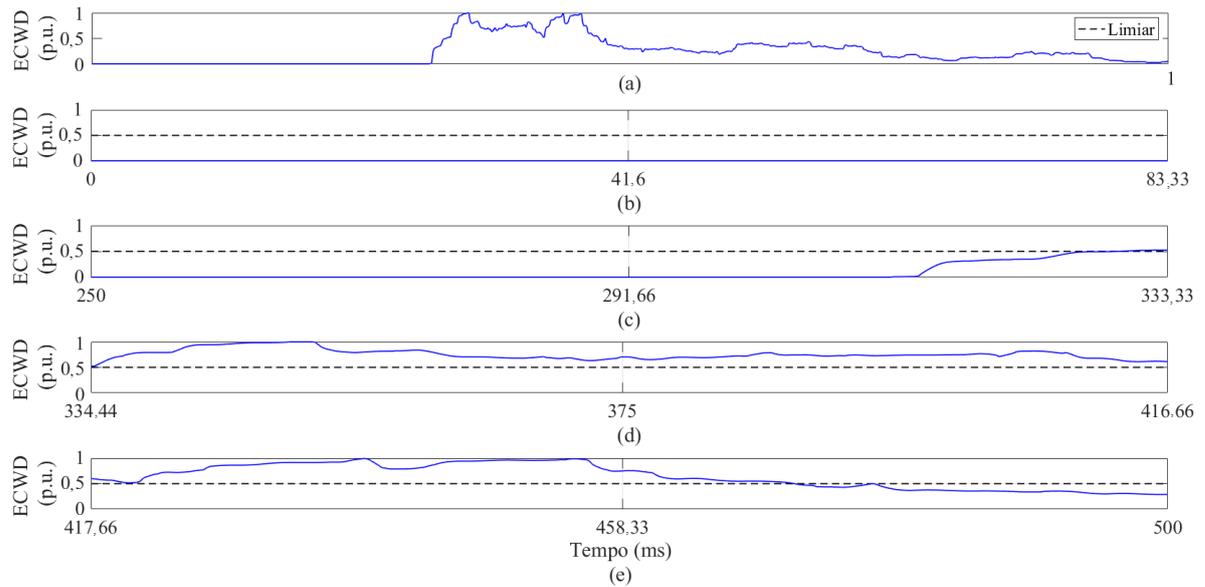


Fonte: autoria própria.

Na Figura 39 (a), a ECWD é verificada durante toda a duração do sinal na fase C. Nas Figuras 39 (b) a (e), os gráficos desse fenômeno são observados em janelas de tempo menores. Na Figura 39 (b) o fenômeno 25 ciclos antes da ocorrência do CI é apresentado. Neste janelamento, o limiar β não é ultrapassado.

Por outro lado, na Figura 39 (c) os resultados são apresentados, quando há o cruzamento entre o limiar β estabelecido e a primeira amostra obtida durante o CI (250 ms a 333,33 ms). Na Figura 39 (d), a ECWD apresenta valores máximos que ultrapassam β durante toda a janela correspondente a 334,44 ms a 416,66 ms. Semelhantemente, durante o janelamento seguinte, Figura 39 (e), observa-se a ocorrência da CI a partir da análise dos valores máximos das energias ($ECWD_{Ia} > \beta$). Diante disso, a classificação da assinatura do CI a partir da ECWD ocorreu corretamente. Os resultados obtidos na fase B são análogos aos que foram apresentados nas fases A e C.

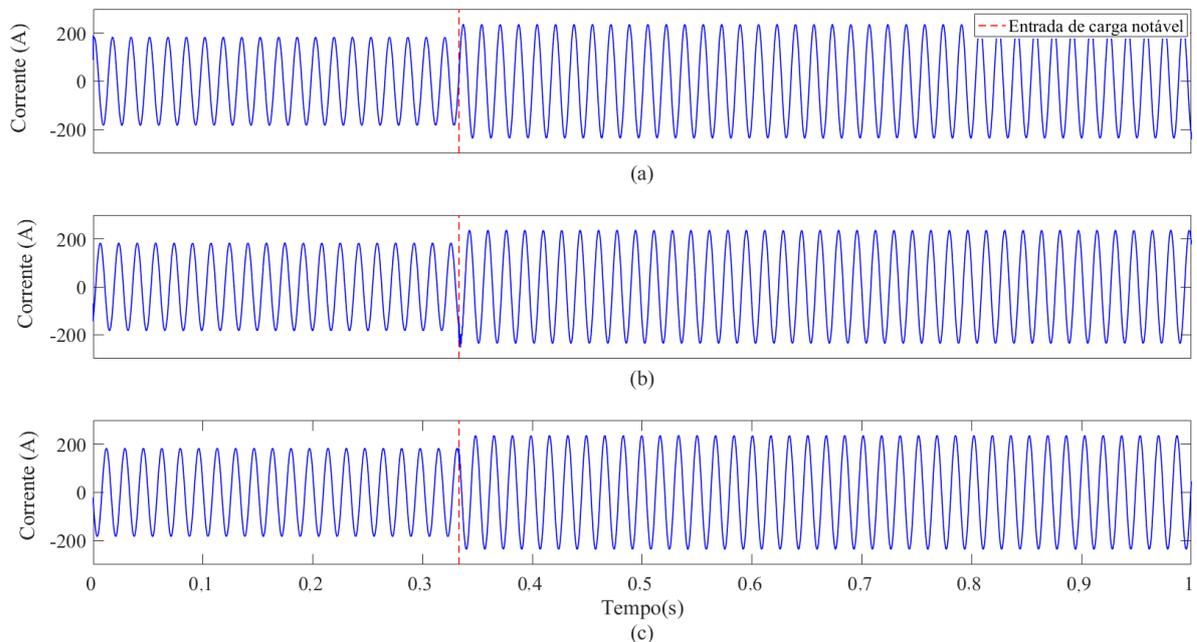
Figura 39 – Fenômeno CI, nó 17, na fase C: (a) Sinal completo da ECWD; (b) Vinte e cinco ciclos antes da CI; (c) 1ª amostra com CI; (d) Primeiros ciclos após o início da CI, (e) Cinco ciclo após o início da CI.



Fonte: autoria própria.

Na Figura 40 (a), (b) e (c) observam-se os sinais típicos do fenômeno de carga notável, simulados no *software* ATP, das correntes das fases A, B e C, nesta ordem. As condições de simulação foram as mesmas adotadas para o fenômeno CI (chave alocada no nó 17 e carregamento igual a 100%).

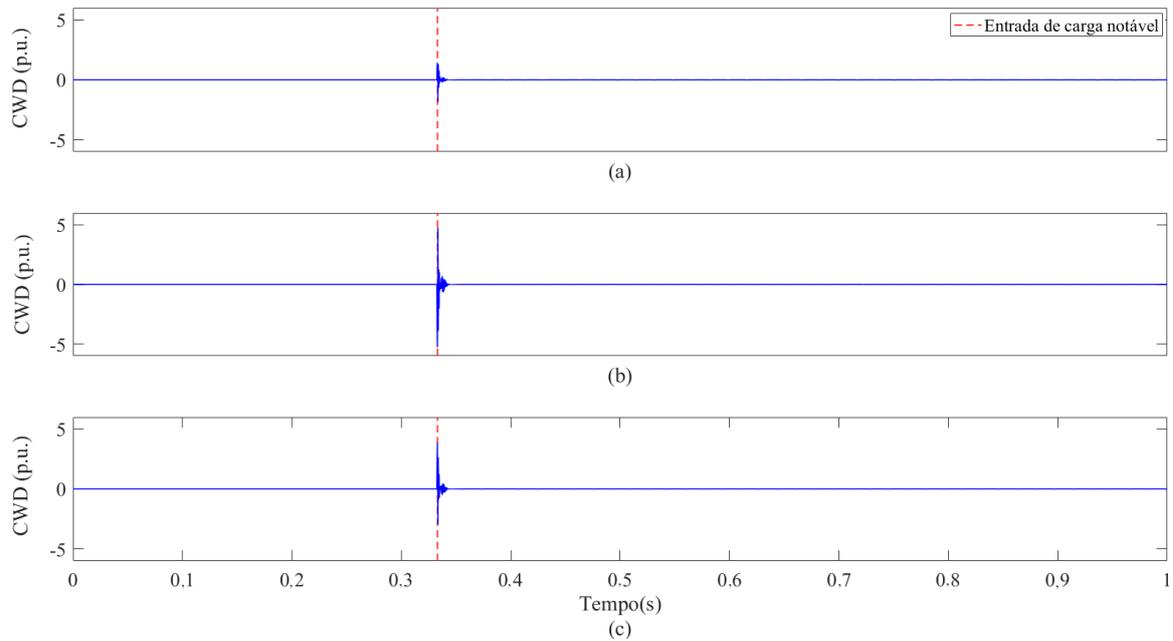
Figura 40 – Carga notável, nó 17: (a) Corrente na fase A; (b) Corrente na fase B; (c) Corrente na fase C.



Fonte: autoria própria.

Observam-se, na Figura 41 (a), (b) e (c) os CWD extraídos das fases A, B e C, nessa ordem. No instante de ocorrência do fenômeno (em 0,333 s), esses parâmetros são caracterizados por um pico que retorna as condições iniciais algumas amostras depois. Isso ocorre, pois, esse fenômeno é caracterizado pelo aparecimento de transitórios eletromagnéticos temporários no instante em que a carga é conectada ao SD.

Figura 41 – Carga notável, nó 17: (a) CWD na fase A; (b) CWD na fase B; (c) CWD na fase C.



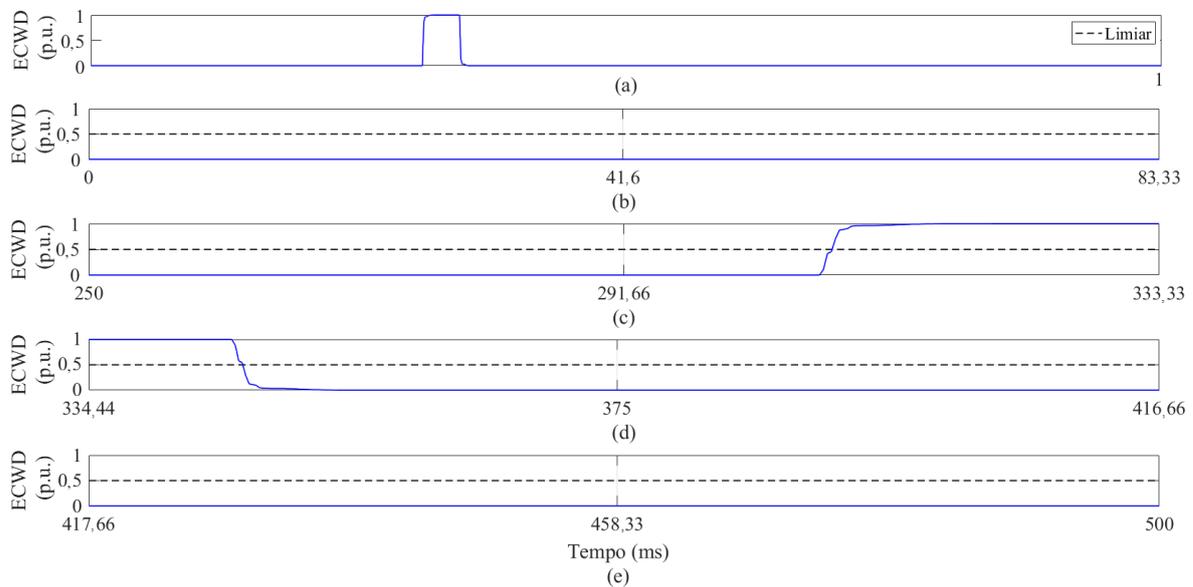
Fonte: autoria própria.

Na Figura 42 (a), a ECWD, extraída do CWD da fase B, é mostrada durante toda a duração do sinal transitório. Nas Figuras 42 (b) a (e), os gráficos desse fenômeno são observados em janelas de tempo menores (5 ciclos). Na Figura 42 (b) o parâmetro de energia antes da ocorrência do fenômeno (0 ms a 83,33 ms) é apresentado. O limiar (linha tracejada preta) não é ultrapassado, ou seja, $ECWD_{Ib} < \beta$.

Na Figura 42 (c) apresentam-se os resultados no instante em que o limiar de energia β cruzou com a primeira amostra obtida durante a carga notável (250 ms a 333,33 ms). É perceptível que esse aumento na amplitude da ECWD não permanece, se extinguindo nos primeiros milissegundos do janelamento seguinte. Na Figura 42 (d), essa condição é verificada. A ECWD apresenta valores máximos que ultrapassam β apenas durante as primeiras amostras do janelamento. Durante o intervalo de tempo entre 417,66 ms e 500 ms, Figura 42 (e), observa-se que $ECWD_{Ib} < \beta$ durante todo o janelamento. Com base na saturação desse fenômeno no tempo (com duração de apenas 1 janelamento), o algoritmo é capaz de emitir um relatório que

atribui a esse caso o *status* de carga notável, sendo necessário apenas um relatório, já que, a taxa de sucesso durante a classificação depende apenas da detecção correta em uma das fases.

Figura 42 – Carga notável, nó 17, na fase B: (a) Sinal completo da ECWD; (b) Vinte e cinco ciclos antes da carga notável; (c) 1ª amostra com carga notável; (d) Primeiros ciclos após o início da carga notável, (e) Cinco ciclos após o início da carga notável.



Fonte: autoria própria.

Em toda base de dados analisada observou-se comportamento semelhante ao que foi descrito. Assim, uma classificação correta em todos os casos simulados foi obtida, quanto a identificação da ocorrência do fenômeno (limiar da energia), bem como, quanto a diferenciação entre os dois fenômenos analisando-se apenas a saturação no tempo.

5.1.4 AÇÕES DE MONITORAMENTO: DISTORÇÃO HARMÔNICA E VARIAÇÃO DE FREQUÊNCIA

Para o cálculo da DHT consideraram-se “janelas” na estimação das informações espectrais, que são funções de ponderação aplicadas às informações para reduzir o espalhamento espectral associado aos intervalos de observação finitos, no algoritmo proposto da TF. De acordo com (HARRIS, 1978), janelas reduzem a contribuição das amostragens próximas dos pontos limítrofes, minimizando a descontinuidade e seus efeitos na resposta em frequência. A propriedade da periodicidade da TDF – utilizada nos algoritmos propostos – é a responsável pela geração da descontinuidade nas extremidades da sequência de tamanho finito.

Alguns testes foram realizados com 3 tipos de janelas diferentes: janela retangular, janela de Hanning e janela de Kaiser (LIM, BACE, *et al.*, 1987; VASEGHI, 2008; AHMED e

RAO, 2012). A janela retangular não demonstrou resultados adequados, já que o fenômeno do espalhamento espectral ainda foi observado. Já as janelas de Hanning e de Kaiser mostraram-se eficientes quanto a solução do problema, no entanto, levando-se em consideração que a janela de Hanning depende apenas do parâmetro M (comprimento do sinal) e a janela de Kaiser depende de M e de N (parâmetro de curva), optou-se por utilizar a janela de Hanning no cálculo da DHT.

No algoritmo responsável por verificar a variação de frequência foi adotado um procedimento de cálculo de média ponderada dentro da faixa frequências de interesse, a fim de aumentar a exatidão dos resultados. Como a frequência da rede tende a distanciar-se muito pouco dos 60 Hz, um limite entre 50 Hz e 70 Hz foi estabelecido, o que ainda é uma faixa bastante larga e conservadora. Desta maneira, mesmo em situações em que a distorção é elevada, a estimação da fundamental é pouco afetada, garantindo resultados mais exatos.

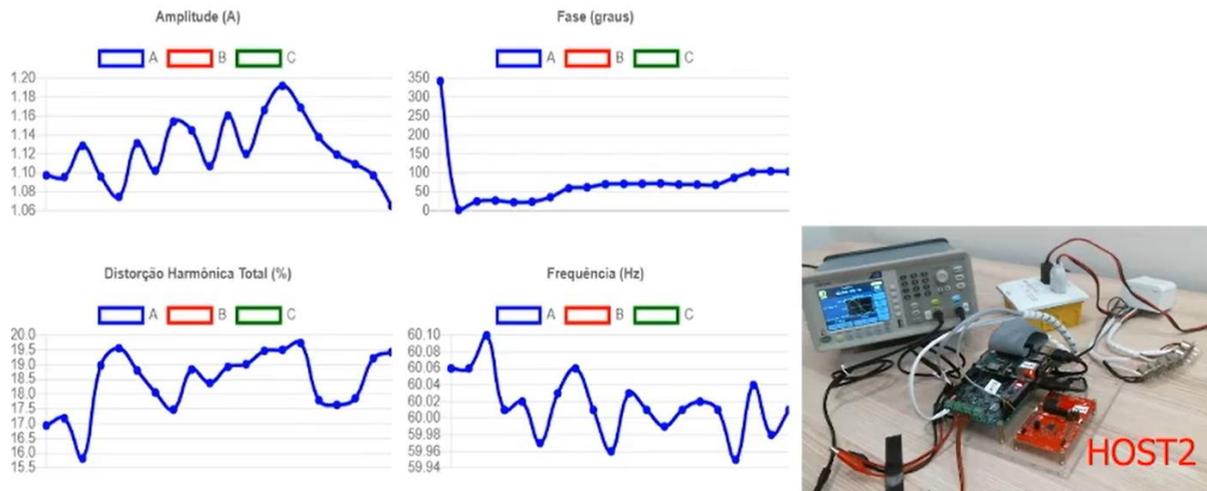
Para todos os casos simulados, o algoritmo proposto envia corretamente as informações necessárias quanto a DHT e a variação de frequência.

5.1.4.1 RESULTADOS OBTIDOS NO SISTEMA EMBARCADO

Durante a execução do projeto “Novos Elementos de Automação de Rede, com Funções Avançadas de Inteligência Distribuída” a equipe da UFPA desenvolveu um *software* embarcado, cuja camada está projetada para incluir funções de reconhecimento de assinaturas de eventos transitórios desenvolvidas neste trabalho. Para efeitos ilustrativos, serão apresentados nesta seção a interface gráfica deste *software*.

Na Figura 43 a interface gráfica do *software* embarcado, que analisa as formas de onda das correntes trifásicas capturadas, é observada. Nesta figura apresentam-se a amplitude da corrente na fase A e os respectivos valores do ângulo (em graus), da DHT e da frequência processados pelo algoritmo proposto. Estes valores são observados em tempo real.

Figura 43 – Interface gráfica do *software* embarcado: análise da corrente na fase A.



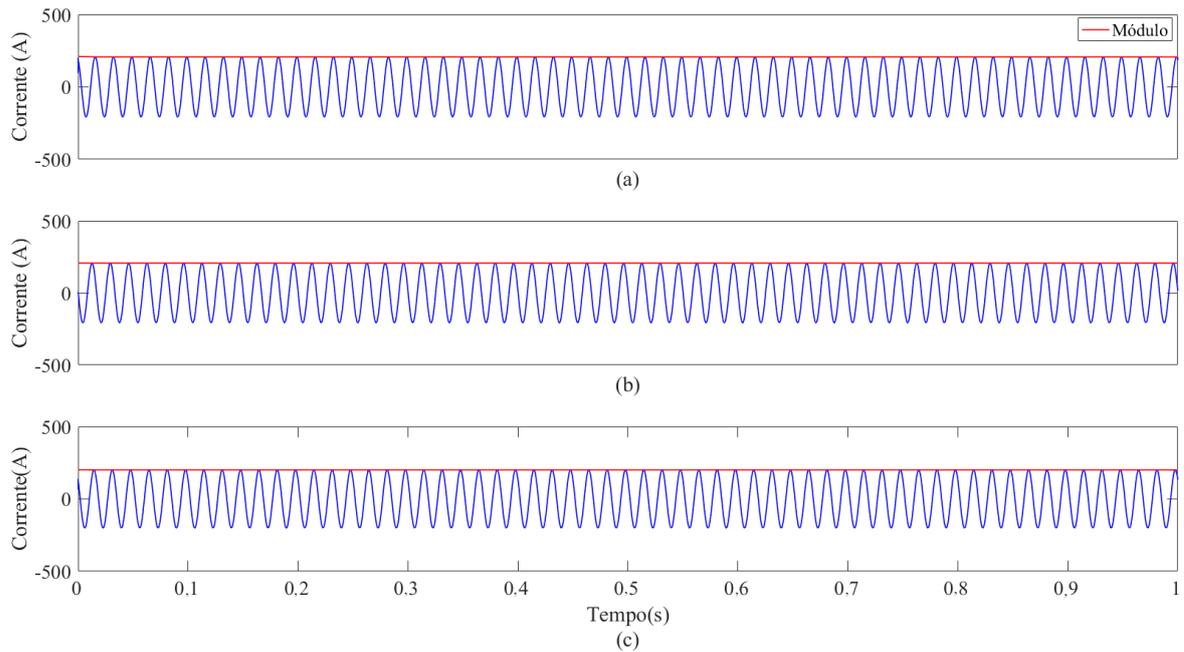
Fonte: autoria própria.

5.1.5 AÇÕES DE MONITORAMENTO: DESEQUILÍBRIO DE CORRENTE

A estimação fasorial foi utilizada para verificar o desequilíbrio de corrente em tempo real em SD. Cada amostra de um sinal digitalizado é representada fasorialmente, ou seja, em termo dos valores dos módulos e das fases dos sinais de corrente para cada instante de tempo discreto. Neste trabalho, a técnica utilizada para estimação é a MMQ.

Na Figura 44 (a), (b) e (c) observam-se os valores das correntes em cada fase, A, B e C, respectivamente, bem como, os módulos correspondentes (cor vermelha) de um caso de desequilíbrio de fase simulado no *software* ATP. Naturalmente, espera-se que a estimação do módulo oscile se o valor da amplitude da corrente oscilar.

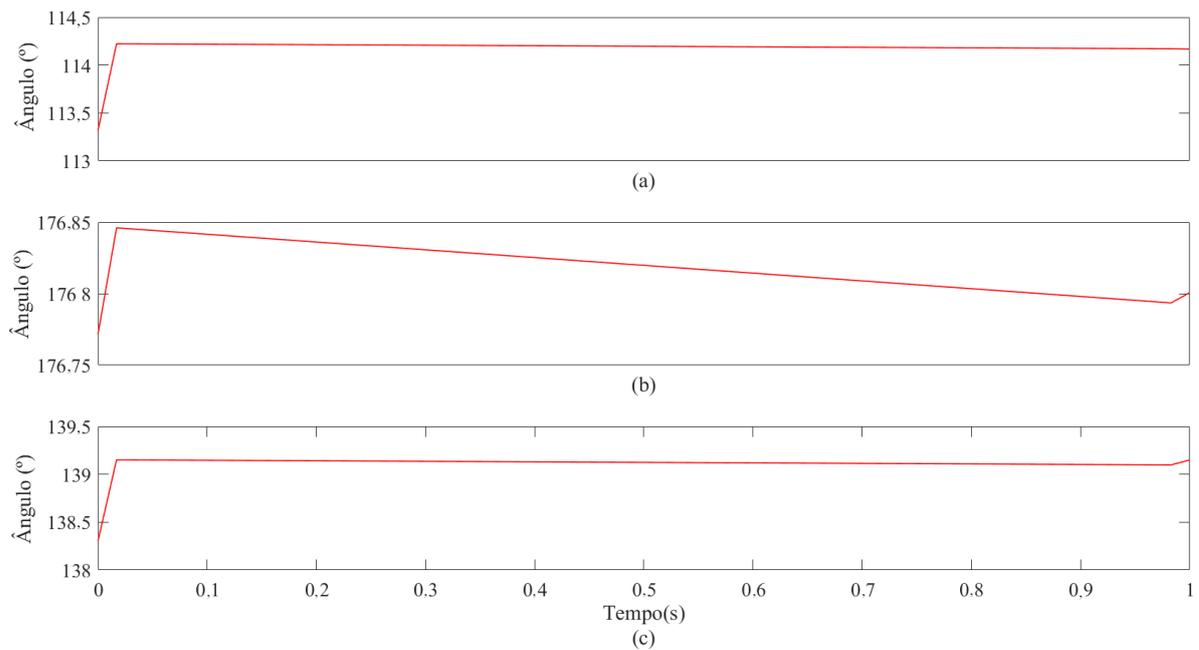
Figura 44 – Módulos estimados das correntes: (a) Corrente e módulo na fase A; (b) Corrente e módulo na fase B; (c) Corrente e módulo na fase C.



Fonte: autoria própria.

Com a estimação dos módulos dos sinais senoidais apresentada, na Figura 45 (a), (b) e (c) observam-se os ângulos estimados nas ondas de corrente de fase A, B e C, respectivamente. Todos os ângulos são apresentados na escala de graus e a queda observada na fase B (Figura 45 (b)) decorre da escala utilizada no eixo das ordenadas.

Figura 45 – Ângulos estimados das correntes: (a) Ângulo na fase A; (b) Ângulo na fase B; (c) Ângulo na fase C.



Fonte: autoria própria.

Enquanto os módulos são praticamente iguais nas três oscilografias apresentadas, os ângulos possuem valores diferentes para cada fase analisada. Na Tabela 7 apresentam-se os valores médios dos ângulos estimados nas fases da corrente durante o primeiro janelamento de 5 ciclos, como foi mostrado na forma gráfica na Figura 45.

Tabela 8 – Ângulos estimados para as fases de corrente.

Fase	Ângulo
A	114,19
B	176,82
C	139,12

Fonte: autoria própria.

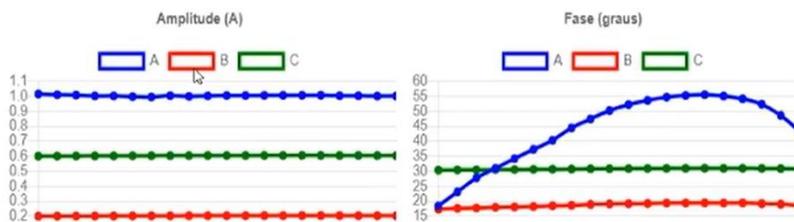
O espaçamento entre as fases foi de $-62,62^\circ$ ($\theta(I_a) - \theta(I_b)$), $37,69^\circ$ ($\theta(I_b) - \theta(I_c)$) e $27,92^\circ$ ($\theta(I_c) - \theta(I_a)$). Sendo assim, o desequilíbrio de corrente foi verificado.

5.1.5.1 RESULTADOS OBTIDOS NO SISTEMA EMBARCADO

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos na interface gráfica do *software* embarcado desenvolvido em parceria com a UFPA. Enfatiza-se que estes são meramente ilustrativos.

Na Figura 46, a interface gráfica do *software* embarcado responsável por analisar as formas de onda das correntes nas fases A, B e C é verificada. Os ângulos estimados das correntes são analisados, em tempo real, com o intuito de mensurar o espaçamento entre as fases. Com isso, identifica-se se ocorreu ou não desequilíbrio de corrente.

Figura 46 – Interface gráfica do *software* embarcado: análise das correntes nas fases A, B e C e dos seus respectivos ângulos.



Fonte: autoria própria.

Na próxima seção será realizada uma análise dos casos reais fornecidos pela EDP Brasil.

5.2 AVALIAÇÃO DOS CASOS REAIS

Após a realização de sucessivos testes com dados simulados, considerou-se também uma base de dados com registros reais de diferentes curtos-circuitos fornecidos pela EDP Brasil. Ao todo, 41 grupos de oscilografias reais, advindas de diversos alimentadores, foram incorporados à base de dados. Relatórios com as ações de desligamento e com as informações sobre o evento também foram fornecidos. Com isso se pretende evitar que os critérios de diferenciação e os limiares admitidos anteriormente não sejam compatíveis em topologias de sistemas de distribuição reais.

5.2.1 AÇÕES PRIORITÁRIAS: CURTOS-CIRCUITOS

Os registros oscilográficos de curtos-circuitos reais também foram reamostrados e decompostos por meio da TWD (db4, em seu primeiro nível de decomposição), normalização (pelo valor máximo obtido nos registros em cada janelamento em todas as fases de corrente), janelamento (1, 2, 3 ou 4 ciclos) e classificação (critérios de diferenciação).

Linhas tracejadas vermelhas verticais foram utilizadas para delimitar os momentos iniciais e finais de ocorrência do curto-circuito em todos os registros mostrados no decorrer desta seção. Esse é o intervalo dentro do qual o fenômeno é avaliado pelo algoritmo proposto.

Na Tabela 9 observam-se as taxas de sucesso obtidas na classificação realizada com o limiar λ proposto na classificação dos casos simulados, durante a comparação entre as ECWA extraídas das fases A, B e C das correntes trifásicas, e para o limiar k proposto para a avaliação de In , nos casos em que é necessário diferenciar os curtos-circuitos fase-fase dos fase-fase-terra. É importante ressaltar que todas as características comuns aos transientes gerados pelos curtos-circuitos simulados também estão presentes nos curtos-circuitos reais.

Tabela 9 – Taxas de sucesso obtidas para a base de dados real.

Curtos-circuitos	Oscilografias	Classificação de curtos-circuitos			
		Janelamento (número de ciclos)			
		1	2	3	4
Fase-terra A	4	100%	100%	100%	100%
Fase-terra B	2	100%	100%	100%	100%
Fase-terra C	4	100%	100%	100%	100%
Fase-fase AB	1	100%	100%	100%	100%
Fase-fase AC	3	66,7%	66,7%	66,7%	66,7%
Fase-fase BC	21	76,2%	95,2%	95,2%	95,2%
Trifásico	6	100%	100%	100%	100%
TOTAL	41	85,4%	95,1%	95,1%	95,1%

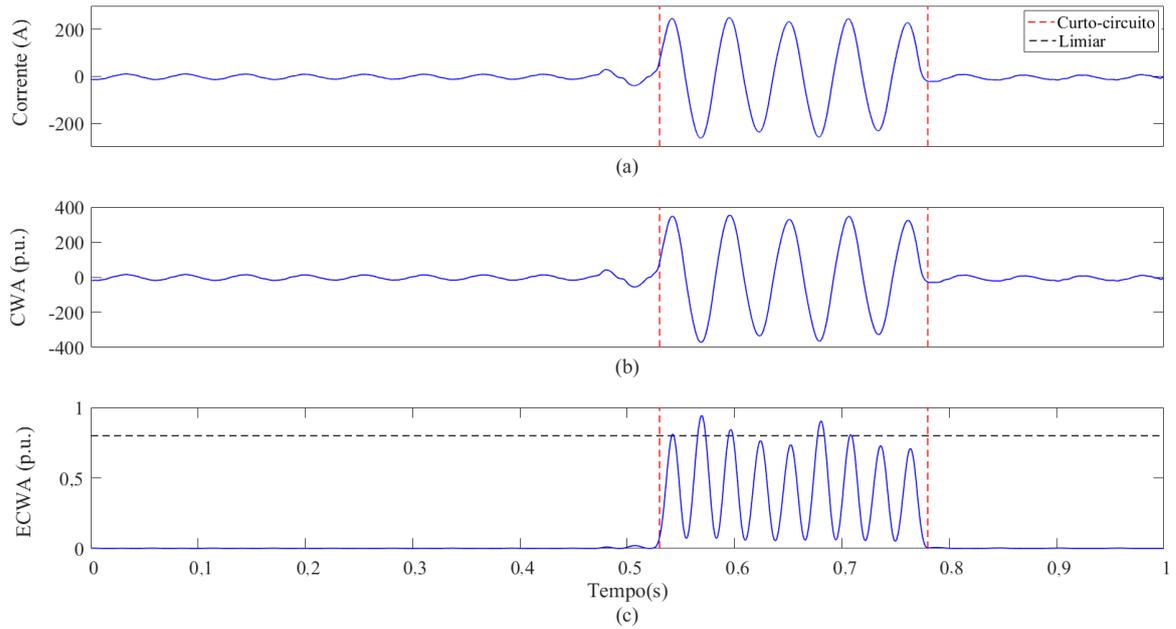
Fonte: autoria própria.

5.2.1.1 CURTO-CIRCUITO FASE-TERRA

Nas Figuras 47, 48 e 49 apresentam-se os resultados obtidos com a aplicação do algoritmo nas correntes trifásicas de um curto-circuito real fase-terra A.

Na Figura 47 (a) a fase A da corrente (I_a) é verificada. Neste caso, o instante de pré-falta (0 s a 0,53 s), falta (0,53 s a 0,78 s) e pós-falta (0,78 s a 1 s) são observados. Da mesma maneira, na Figura 47 (b) é apresentado o CWA filtrado da corrente I_a , e na Figura 47 (c), verifica-se o parâmetro de energia, ECWA, a ser avaliado no módulo de classificação. Para o valor da ECWA em cada janelamento e os critérios de diferenciação, constataram-se que os valores máximos das energias sempre são maiores que o limiar proposto λ . Com isso, a metodologia é capaz de emitir um relatório que constata a presença da assinatura de curto-circuito nesta fase.

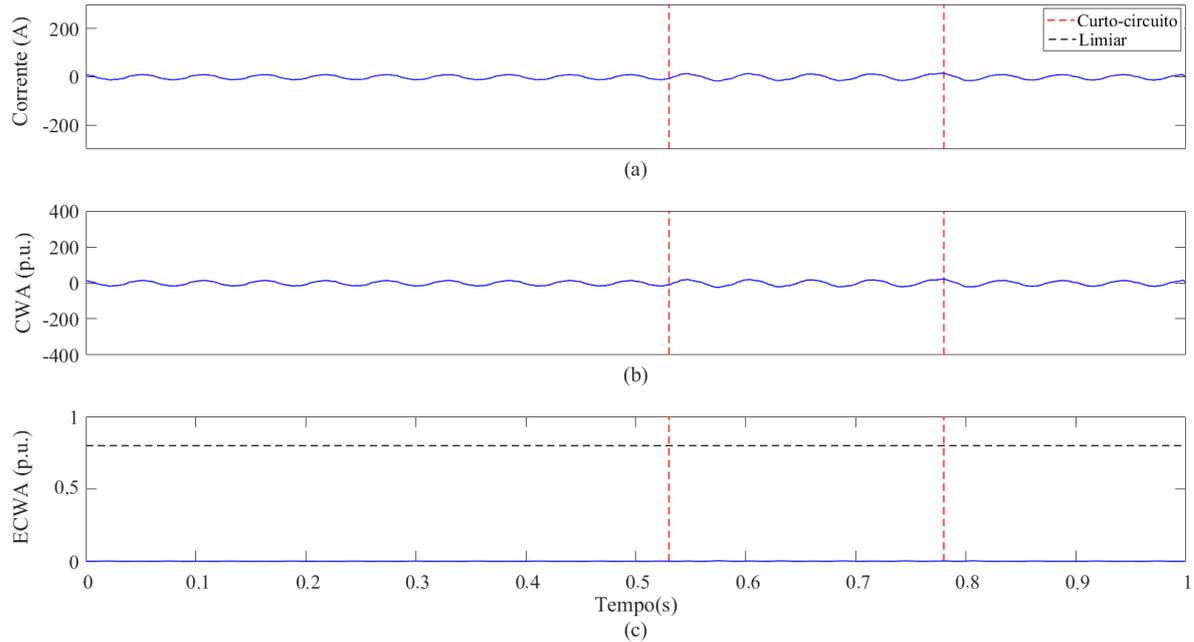
Figura 47 – Curto-circuito real fase-terra A: (a) Corrente na fase A; (b) CWA; (c) ECWA.



Fonte: autoria própria.

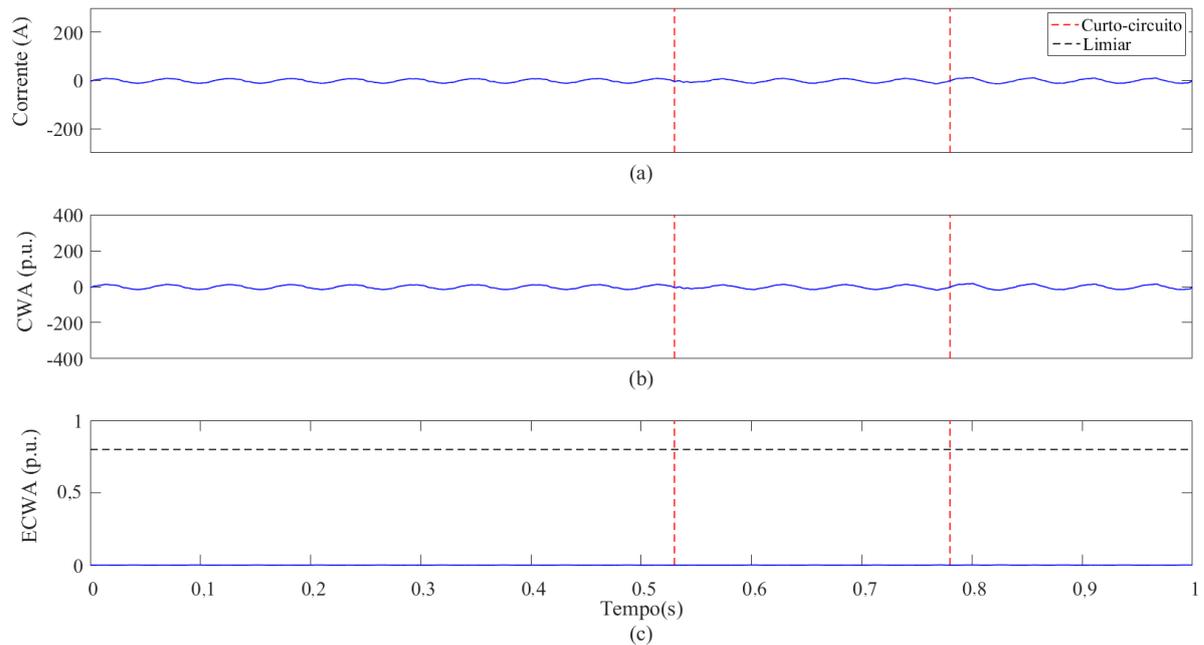
Dando continuidade à análise, observam-se os resultados obtidos com a aplicação da metodologia nas fases B (*I_b*) e C (*I_c*) das correntes do mesmo curto-circuito nas Figuras 48 e 49, respectivamente. Nas Figuras 48 (b) e 49 (b) observam-se os CWA filtrados das correntes *I_b* e *I_c*, nessa ordem. Em ambos os casos não há evidência da ocorrência de nenhum transitório, afinal, os valores máximos de CWA mantêm-se constantes em todo intervalo de tempo. Da mesma maneira, verifica-se que com a extração das ECWA, Figuras 48 (c) e 49 (c), o comportamento descrito anteriormente se repete. No intervalo entre 0,53 e 0,78 s o valor máximo obtido para ECWA é de 0,004 p.u., na Figura 48 (c), e 0,0024 p.u., na Figura 49 (c). Sendo assim, não há indícios de transitórios nestas fases em análise.

Figura 48 – Curto-circuito real fase-terra A: (a) Corrente na fase B; (b) CWA; (c) ECWA.



Fonte: autoria própria.

Figura 49 – Curto-circuito real fase-terra A: (a) Corrente na fase C; (b) CWA; (c) ECWA.



Fonte: autoria própria.

Ademais, como a metodologia é capaz de avaliar simultaneamente as três fases da corrente, o relatório emitido atribuiu a esse registro uma falta fase-terra A.

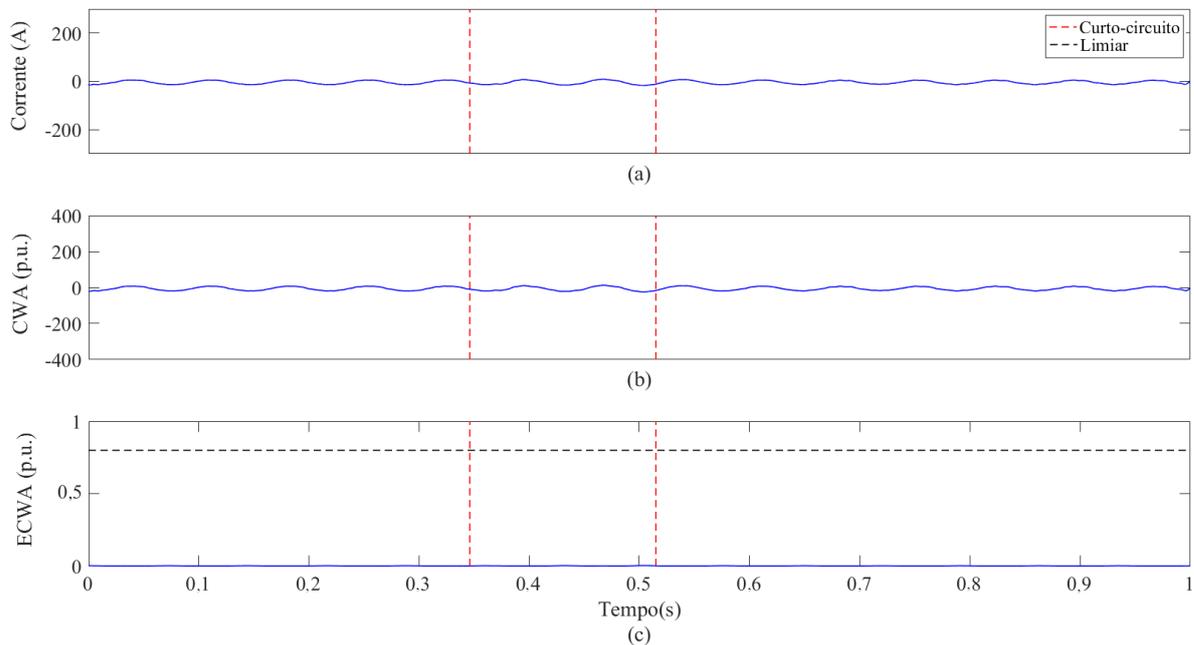
5.2.1.2

CURTO-CIRCUITO FASE-FASE

Nas Figuras 50, 51 e 52 os resultados obtidos com a aplicação TWD são apresentados nas correntes trifásicas de um curto-circuito real fase-fase BC.

Na Figura 50 (a) a fase A da corrente (I_a) é observada. Neste caso a corrente apresentou o mesmo comportamento durante todo intervalo de tempo descrito. O mesmo ocorre quando verificamos os parâmetros CWA e ECWA apresentados, respectivamente, nas Figuras 50 (b) e (c). Durante o intervalo delimitado pelas linhas tracejadas vermelhas o valor máximo obtido de ECWA é igual a 0.00046 p.u.. Com isso, conclui-se que não há assinatura de curto-circuito nesta fase.

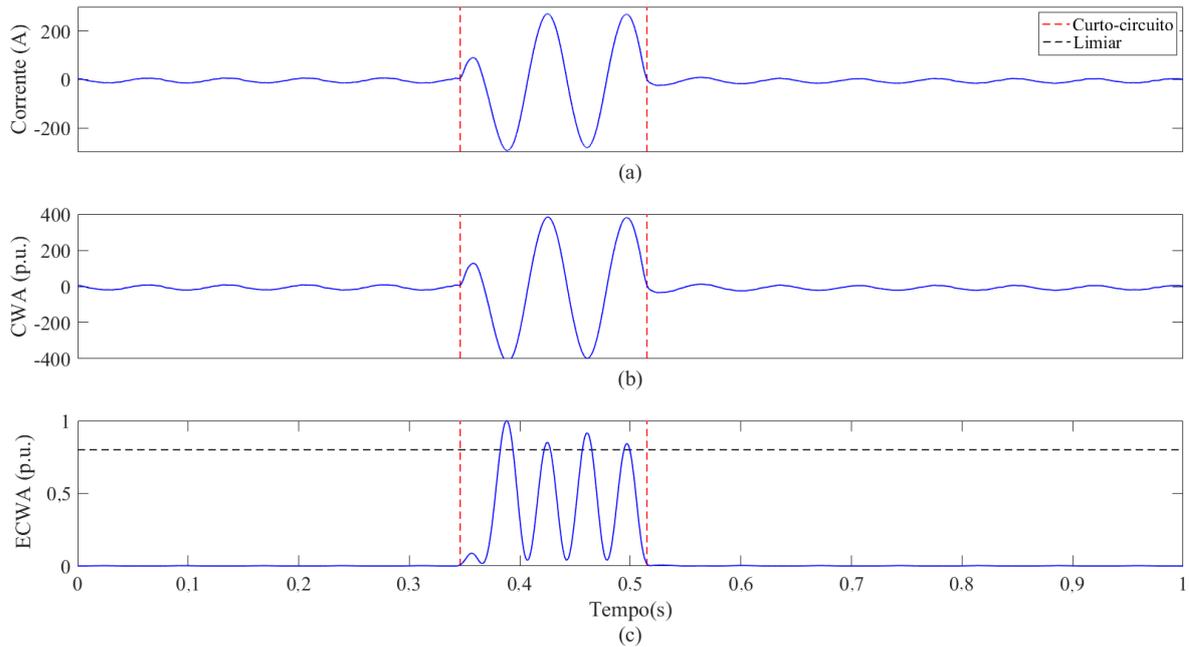
Figura 50 – Curto-circuito real fase-fase BC: (a) Corrente na fase A; (b) CWA; (c) ECWA.



Fonte: autoria própria.

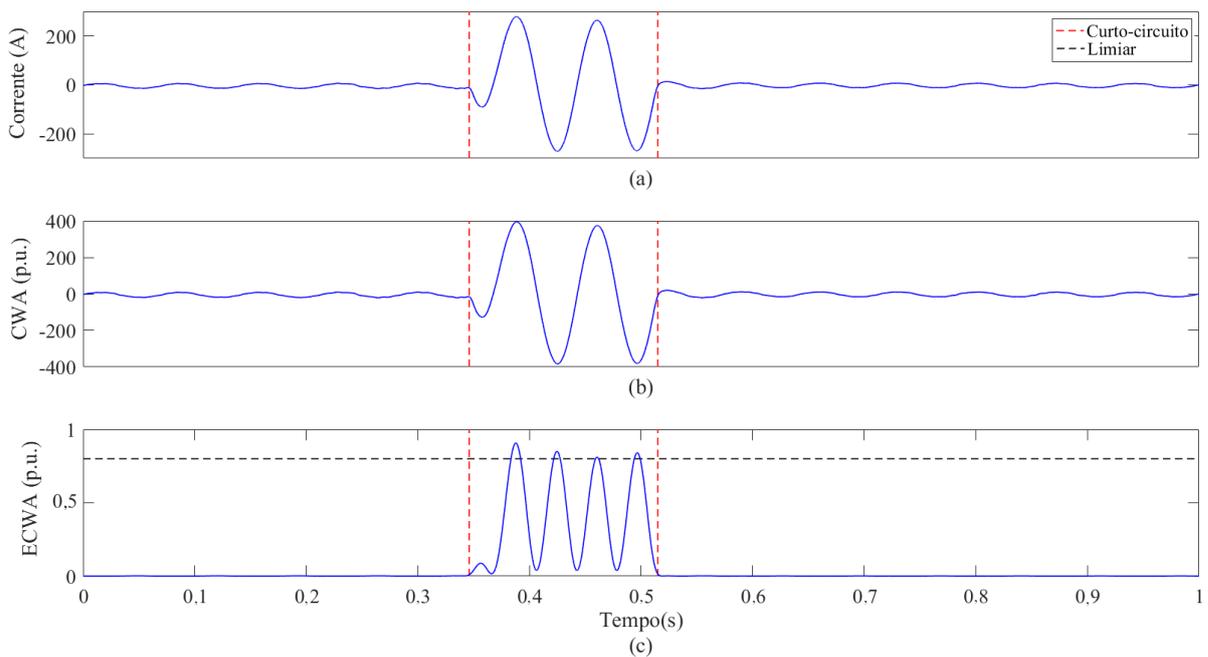
Os resultados obtidos com a aplicação da metodologia nas fases B (I_b) e C (I_c) das correntes do mesmo curto-circuito fase-fase BC são observados nas Figuras 51 e 52, respectivamente. Inicialmente, os CWA filtrados (Figura 51 (b) e Figura 52 (b)) são observados. Um aumento considerável desses parâmetros no instante de ocorrência do fenômeno (linha tracejada vermelha) é verificado. Esses valores permanecem assim até que, em 0,518, o curto-circuito seja eliminado. Com a extração das ECWA, Figuras 51 (c) e 52 (c), o comportamento descrito anteriormente é equivalente. No intervalo entre 0,3525 e 0,518 s os valores de ECWA cruzam o limiar λ durante o janelamento proposto. Com base nos critérios de diferenciação assume-se que há assinatura de curto-circuito nas fases B e C do fenômeno estudado.

Figura 51 – Curto-circuito real fase-fase BC: (a) Corrente na fase B; (b) CWA; (c) ECWA.



Fonte: autoria própria.

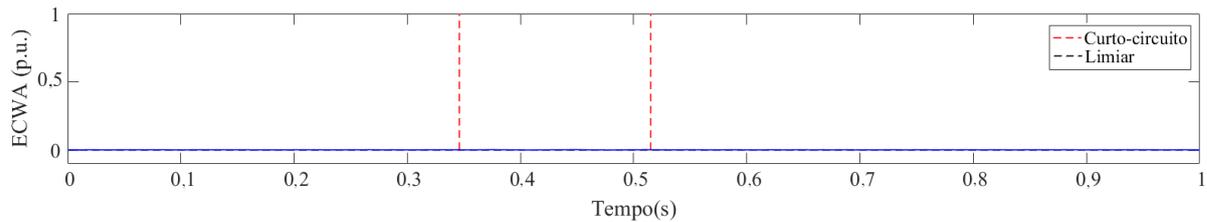
Figura 52 – Curto-circuito real fase-fase BC: (a) Corrente na fase C; (b) CWA; (c) ECWA.



Fonte: autoria própria.

Para verificar se há ou não o envolvimento da terra nesta falta, a ECWA também foi extraída da corrente I_n e normalizada pelo valor máximo dos perfis de energia de I_a , I_b , I_c e I_n em cada janelamento, Figura 53. O valor da energia é menor que o limiar proposto k ($ECWA_{I_n} \leq k$) e, por isso, não há o envolvimento da terra nesta falta.

Figura 53 – ECWA obtida da corrente de neutro de um processamento de um curto-circuito real fase-fase BC.



Fonte: autoria própria.

Ao analisar simultaneamente os valores de ECWA em cada janelamento das três fases das correntes e da corrente de neutro e, com base nos critérios de diferenciação propostos, constatou-se que esta falta é fase-fase BC.

5.2.1.3 CASO PARTICULAR: FALTA EVOLUTIVA

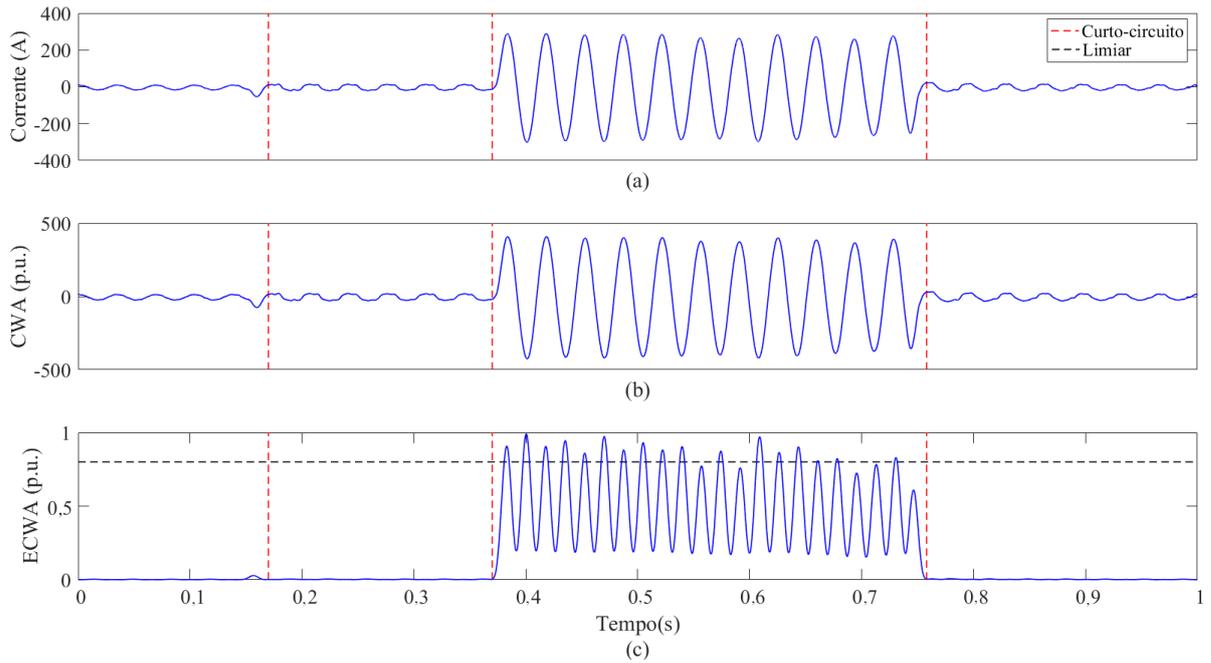
Considerando que em SD reais há a ocorrência de faltas evolutivas – curtos-circuitos que com o passar do tempo envolvem outras fases, anteriormente “saudáveis” – pretende-se apresentar nesta seção um caso particular de uma falta fase-fase que evoluiu para uma falta trifásica.

Do ponto de vista prático, em uma falta evolutiva, o instante em que a falta muda de tipo é caracterizado pela incidência de transitórios (BOLLEN e GU, 2006).

Nas Figuras 54, 55 e 56 apresentam-se os resultados obtidos com a aplicação da metodologia nas correntes trifásicas de um curto-circuito evolutivo. Na caso descrito a classificação falhou para um janelamento de 1 ciclo. Para os demais janelamentos a classificação foi correta. Esse erro decorre do comportamento instável das primeiras amostrados da ECWA, que não acontecia na base de dados simulada.

Na Figura 54 (a) o sinal de corrente obtido na fase A (I_a) é apresentado. Com base nas Figuras 54 (b) e (c) observa-se uma mudança na amplitude dos parâmetros CWA e ECWA em 0,37 s. Sendo assim, com base nas ECWA e nos critérios de diferenciação, esse instante de tempo marca a ocorrência de um transitório nesta fase até que, em 0,758, o fenômeno é eliminado. O limiar proposto λ é cruzado várias vezes durante o janelamento da energia no intervalo de tempo entre 0,37 s e 0,758 s.

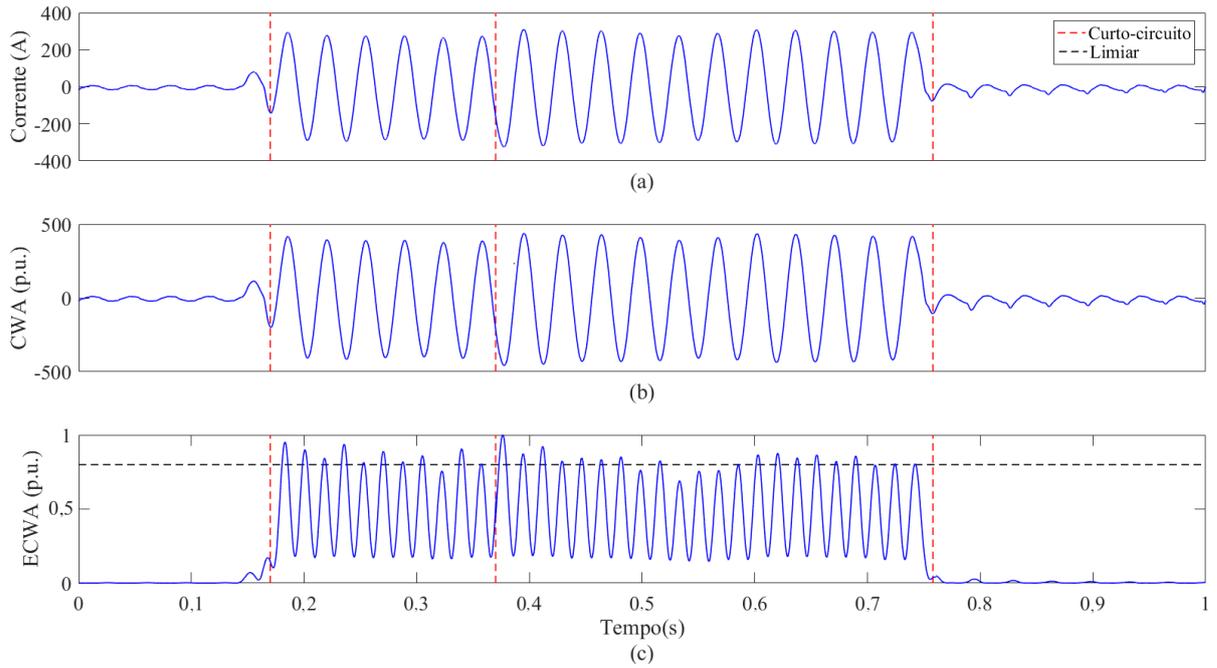
Figura 54 – Falta evolutiva: (a) Corrente na fase A; (b) CWA; (c) ECWA.



Fonte: autoria própria.

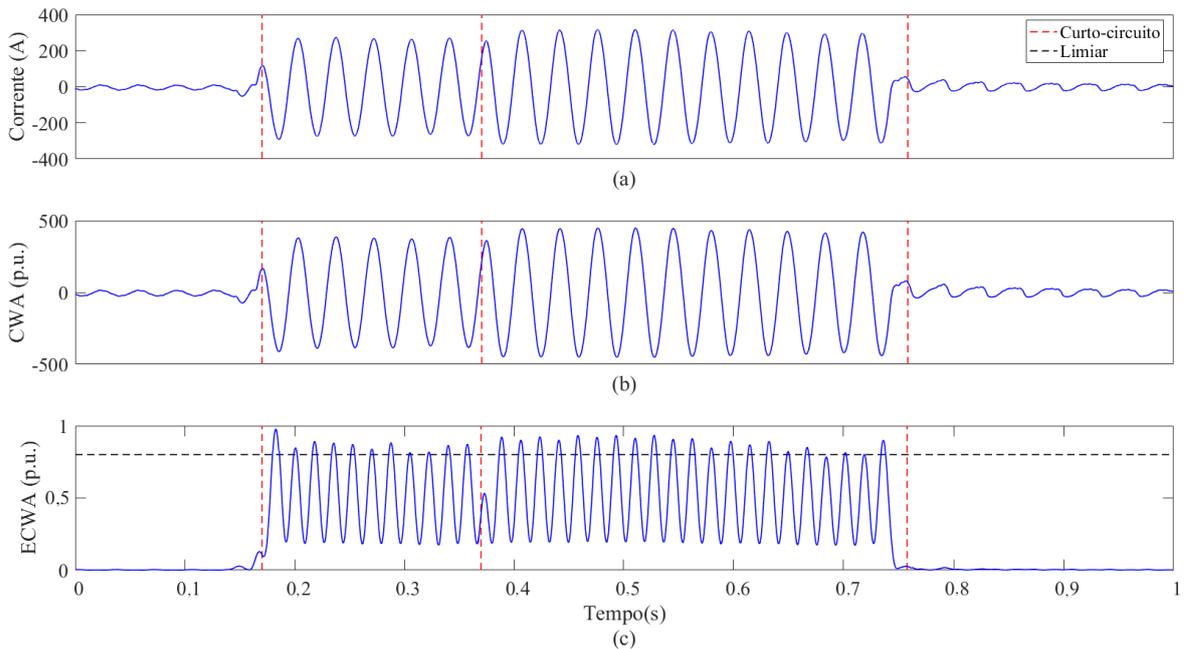
Dando continuidade à análise do fenômeno, nas Figuras 55 e 56 são apresentados, respectivamente, os resultados obtidos com a aplicação da metodologia nas fases B (*I_b*) e C (*I_c*) das correntes. Inicialmente, os CWA filtrados (Figuras 55 (b) e 56 (b)) são observados. Diferentemente do que se observou anteriormente, um aumento significativo do parâmetro CWA no instante de tempo igual a 0,17 s é verificado. Nesse mesmo instante extraem-se valores de ECWA (Figuras 55 (c) e 56 (c)) que ultrapassam o limiar λ estabelecido ($ECWA_{I_b} > \lambda$ e $ECWA_{I_c} > \lambda$) durante o intervalo de tempo definido entre 0,17 s e 0,758 s.

Figura 55 – Falta evolutiva: (a) Corrente na fase B; (b) CWA; (c) ECWA.



Fonte: autoria própria.

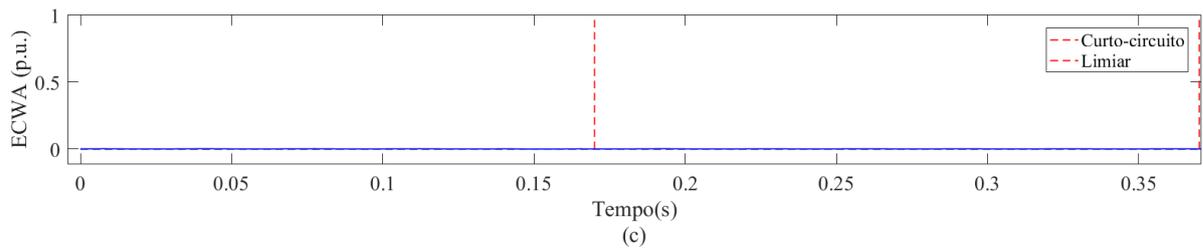
Figura 56 – Falta evolutiva: (a) Corrente na fase C; (b) CWA; (c) ECWA.



Fonte: autoria própria.

Para verificar envolvimento da terra entre 0,17 s e 0,37 s, a ECWA também foi extraída da corrente I_n e normalizada pelo valor máximo dos perfis de energia de I_a , I_b , I_c e I_n em cada janelamento, conforme apresentado na Figura 57. O valor da energia é menor que o limiar k ($ECWA_{I_n} \leq k$), por isso constata-se o não o envolvimento da terra.

Figura 57 – ECWA obtida da corrente de neutro de um processamento de um curto-circuito real fase-fase BC.



Fonte: autoria própria.

De acordo com a análise das ECWA e dos critérios de diferenciação, conclui-se que entre 0,17 s e 0,37 s há assinatura de curto-circuito apenas nas fases B e C do fenômeno estudado, ou seja, trata-se de um curto-circuito fase-fase BC. A partir de 0,37 até 0,758 s as três fases apresentam característica que demonstram a presença do transitório.

A partir da análise comparativa entre as energias das três fases das correntes, este algoritmo é capaz de classificar esta falta como evolutiva de fase-fase (BC) para trifásica, afinal, um janelamento durante todo o intervalo de falta é realizado.

6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho apresentaram-se técnicas capazes de classificar determinados DQE e faltas no SEP (curto-circuito fase-terra; curto-circuito fase-fase; curto-circuito fase-fase-terra; curto-circuito trifásico; saturação de núcleos magnéticos (corrente de *inrush*; carga notável; distorção harmônica; desequilíbrio de corrente e; variação de frequência) com base apenas nas formas de onda de corrente, medidas na saída da subestação utilizando majoritariamente a TWD durante a classificação dos sinais. Outras técnicas, como TF e MMQ, foram utilizadas em segundo plano para auxiliar em algumas classificações.

Todas as etapas, conforme foi apresentado na Metodologia, embasaram-se em teorias amplamente conhecidas e utilizadas na área de processamento de sinais. No entanto, a forma como foram aplicadas as tornam capazes de auxiliar no processo de tomada de decisão de alguns equipamentos de proteção, como os religadores, presentes nos atuais SD. A partir de alguns dos resultados apresentados (diferenciação entre a CI de intensidade baixa do fenômeno de carga notável e classificação de curtos-circuitos) foi possível justificar a escolha da família *wavelet* Daubechies e dos níveis de escala, decomposição e filtragem, via AMR, realizada ao longo da simulação dos algoritmos propostos.

Uma base de dados consistente, composta por sinais sintéticos (simulados no *software* ATP) e sinais reais (fornecidos pela EDP Brasil) foi construída. Os sinais de CI de intensidade alta simulados, os 120 curtos-circuitos simulados e os 41 curtos-circuitos reais são os distúrbios nos quais as ações prioritárias (acionadas por um *flag* que indica que o sistema de proteção detectou uma falta) foram aplicadas.

Os distúrbios que exigiam ações de monitoramento baseadas em indicativos dispostos ao longo do PRODIST ou de recomendações do IEEE (distorção harmônica, variação de frequência e desequilíbrio de corrente) foram obtidos exclusivamente via simulação e em menor quantidade. Sinais de CI de intensidade baixa e 30 sinais de carga notável também foram simulados para avaliar a assertividade desta etapa. Para esses distúrbios, a detecção e

classificação ocorreram continuamente e em tempo real, tendo como resultado final o envio de relatórios com a descrição das condições da rede.

A metodologia desempenha corretamente as etapas propostas nas ações prioritárias e de monitoramento. Com a aplicação da TF constatou-se que, em todos os casos, o algoritmo foi capaz de identificar a presença da segunda harmônica na CI de intensidade alta. A análise da segunda harmônica, maior que 5% do valor da primeira harmônica, foi utilizada como indicativo confiável durante essa etapa.

A classificação dos quatro tipos de curtos-circuitos, a partir da aplicação da TWD (db4 em seu primeiro nível de decomposição), ocorreu sem erros em todos os casos simulados, taxa de sucesso de 100%, avaliando-se os perfis de energia durante um janelamento de 1 ciclo. Para os demais janelamentos, o comportamento foi análogo. No que se refere a base de dados composta por 41 oscilografias reais de curtos-circuitos, taxas de sucesso de 85,4% (a partir de um janelamento de 1 ciclo) e 95,1% para os demais casos (janelamentos de 2, 3 e 4 ciclos) foram obtidas. O limiar λ com valor igual a 0,8 e o limiar k definido em 0,00001 p.u. para a avaliação de In foram utilizados nos critérios de diferenciação e mostraram-se eficazes para o sistema-teste simulado e para os 4 tipos diferentes de topologias de SD reais.

A partir da análise dos parâmetros do limiar de energia e da persistência no tempo, aplicando-se a TWD (db4 em seu segundo nível de decomposição), foi possível diferenciar corretamente a ocorrência de uma CI de intensidade baixa do fenômeno de carga notável. O limiar da energia β , definido a partir de trabalhos amplamente divulgados na literatura, foi suficientemente capaz de determinar o instante de tempo em que os fenômenos ocorreram. Já o janelamento com largura de 5 ciclos, menor que o definido nas normas brasileiras, foi capaz de estimar a persistência no tempo e promover a diferenciação entre os dois fenômenos.

As condições relacionadas aos níveis de distorção harmônica, à variação de frequência e ao desequilíbrio de corrente foram monitoradas corretamente nos 75 casos simulados nos softwares ATP e MATLAB.

Os critérios de diferenciação propõem uma abordagem eficiente das energias extraídas dos coeficientes *wavelet* de detalhe e de aproximação.

É factível verificar que os resultados apresentados foram divididos de acordo com as condições de simulação (simulada e real). No entanto, os limiares estimados (com base nas especificações do SEP, topologias dos SD, dos transformadores de potência e do desempenho dos equipamentos de proteção) permitiram a classificação correta dos fenômenos em ambas as bases de dados.

Uma das mais notáveis contribuições da metodologia resulta da normalização das ECWA (com base apenas nos sinais de corrente), afinal, os diversos níveis de corrente que podem ser obtidos em SD reais são avaliados corretamente, para quatro topologias de rede diferentes.

Como recomendações de trabalhos futuros, sugerem-se:

- Ampliar os estudos e análises da aplicação da TWD em outros SD reais;
- Proposição de técnicas para definição de limiares adaptativos às condições de topologias de SD, quando necessário;
- Utilizar técnicas como o Preditor Linear e o Teager-Kaiser Energy Operator durante o processo de classificação de determinados DQE e faltas no SEP;
- Realizar testes com diferentes níveis de ruído para que se analise a sensibilidade da metodologia proposta ao surgimento de componentes ruidosas;

REFERÊNCIAS

- ABBAS, M. F. et al. Inrush current discrimination in power transformer differential protection using wavelet packet transform based technique. **2016 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)**, 2016. 944-948.
- ADDISON, P. S. The illustrated wavelet transform handbook: introductory theory and applications in science, engineering, medicine and finance. **CRC press**, 1989. 674-693.
- AHMED, N.; RAO, K. R. **Orthogonal transforms for digital signal processing**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2012.
- AKAGI, H. New trends in active filters for power conditioning. **Industry Applications**, 1996. 1312-1322.
- ALMALKI, M.; HATZIADONIU, C. Classification of Many Abnormal Events in Radial Distribution Feeders Using the Complex Morlet Wavelet and Decision Trees. **Energies**, 2018. 546.
- ALSHAHRANI, S.; ABBOD, M.; ALAMRI, B. Detection and classification of power quality events based on wavelet transform and artificial neural networks for smart grids. **2015 Saudi Arabia Smart Grid (SASG)**, 2015. 1-6.
- ANEEL. **Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional - PRODIST - Módulo 8 - Qualidade da energia elétrica**. Brasília: [s.n.], v. Revisão 7, 2017.
- ANEEL. DIA DO CONSUMIDOR: Ações da ANEEL levam a melhora no fornecimento de energia elétrica no país em 2018. **ANEEL**, 2019. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao-2/-/asset_publisher/zXQREz8EVIZ6/content/dia-do-consumidor-acoes-da-aneel-levam-a-melhora-no-fornecimento-de-energia-eletrica-no-pais-em-2018/656877/pop_up?_101_INSTANCE_zXQREz8EVIZ6_viewMode=print&_101_I>. Acesso em: 3 Janeiro 2019.
- ASTROM, K. J.; WITTENMARK, B. Computer-Controlled Systems. **A Division of Simon & Schuster-Englewood Cliffs**, 1990.
- BAGGINI, A. **Handbook of power quality**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2008.
- BAXES, G. A. **Digital image processing: principles and applications**. New York: Wiley: [s.n.], 1994.
- BÍSCARO, A. A. P. et al. Integrated fault location and power-quality analysis in electric power distribution systems. IEEE. **IEEE Transactions on power delivery**, 2016. 428-436.
- BOLLEN, M. H.; GU, I. **Signal processing of power quality disturbances**. [S.l.]: John Wiley & Sons, v. 30, 2006.
- BORGHETTI, A. et al. On the use of continuous-wavelet transform for fault location in distribution power systems. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, 2006. 608-617.
- CÉSAR, D. G.; VALDOMIRO, V. G.; GABRIEL, O. P. Automatic power quality disturbances detection and classification based on discrete wavelet transform and artificial intelligence. **2006 IEEE/PES Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin America**, 2006. 1-6.

CHUI, C. **Wavelet analysis and its applications: A tutorial in theory and applications.** [S.l.]: San Diego: Academic press, v. 2, 1992.

CHUNLING, C.; PENGFEI, W.; TONGYU, X. Analysis of power quality transient disturbance signal based on wavelet packet transform. **2011 2nd International Conference on Artificial Intelligence, Management Science and Electronic Commerce (AIMSEC)**, Agosto 2011. 3760-3763.

COELHO, V. L. **Influência das descargas atmosféricas no desempenho de sistemas aéreos de distribuição de energia elétrica.** Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Santa Catarina. 2005.

COOPER POWER SERIES. **General ratings information and catalog guide for single-phase and three-phase reclosers.** [S.l.]. 2016.

COOPER POWER SYSTEMS. **Types VWE, VWVE37, VWVE38X, WE, WVE27, and WVE38X, three-phase electronically controlled reclosers.** [S.l.]. 2014.

COSTA, F. B.; SOUZA, B. A. D.; BRITO, N. S. D. Detecção de faltas evolutivas e múltiplos distúrbios em registros oscilográficos baseada na transformada wavelet discreta. **Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica**, 2010. 173-184.

DAUBECHIES, I. Where do wavelets come from? A personal point of view. **Proceedings of the IEEE**, Abril 1996. 510-513.

DE APRÁIZ, M.; BARROS, J.; DIEGO, R. I. A real-time method for time–frequency detection of transient disturbances in voltage supply systems. **Electric power systems research**, 2014. 103-112.

DE FREITAS, B. K. et al. Exploiting PADE to the Simulation of Multiagent Restoration Actions. **2019 11th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE)**, 2019. 1-5.

DEKHANDJI, F. Z. Detection of power quality disturbances using discrete wavelet transform. **2017 5th International Conference on Electrical Engineering-Boumerdes (ICEE-B)**, 2017. 1-5.

DEOKAR, S. A.; WAGHMARE, L. M. Integrated DWT–FFT approach for detection and classification of power quality disturbances. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, 2014. 594-605.

DEVARAJ, D. et al. Power Quality monitoring using wavelet transform and Artificial Neural Networks. **2006 India International Conference on Power Electronics**, 2006. 425-430.

DIEGO, R. I.; BARROS, J. Global method for time–frequency analysis of harmonic distortion in power systems using the wavelet packet transform. **Electric Power Systems Research**, 2009. 1226-1239.

DUGAN, R. C.; MCGRANAGHAN, M. F.; BEATY, H. W. **Electrical power systems quality.** New York: NY: McGraw-Hill, 1996.

EATON. **Smart single-phase automation and protection solutions.** United States of America. 2013.

FILHO, J. M.; MAMEDE, D. R. **Proteção de sistemas elétricos de potência.** [S.l.]: Grupo Gen-LTC, 2000.

GABOR, D. Theory of communication. Part 1: The analysis of information. **Journal of the Institution of Electrical Engineers-Part III: Radio and Communication Engineering**, Novembro 1946. 429-41.

- GONDANE, P. R. et al. Inrush current detection using wavelet transform and artificial neural network. **2018 Second International Conference on Computing Methodologies and Communication (ICCMC)**, 2018. 866-868.
- GOPIKA, R.; DEEPA, S. Study on Power Transformer Inrush Current. **IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering (IOSR-JEEE)**, 2017. 59-63.
- HAMILTON, R. Analysis of transformer inrush current and comparison of harmonic restraint methods in transformer protection. **IEEE Transactions on Industry Applications** **49**, 2013. 1890-1899.
- HARLOW, J. H. Electric power transformer engineering. **CRC press**, 2003.
- HARRIS, F. J. On the use of windows for harmonic analysis with the discrete Fourier transform. **Proceedings of the IEEE** **66**, 1978. 51-83.
- HUANG, S.-J.; YANG, T.-M.; HUANG, J.-T. FPGA realization of wavelet transform for detection of electric power system disturbances. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 2002. 388-394.
- HUDA, N. H. T.; ABDULLAH, A. R.; JOPRI, M. H. Power quality signals detection using S-transform. **2013 IEEE 7th International Power Engineering and Optimization Conference**, Junho 2013. 552-557.
- HUDSON, A. A. **Transformer magnetising invisible current**: A resume of published information. [S.l.]: [s.n.], 1966.
- IEEE STANDARDS ASSOCIATION. **Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems**. IEEE Power and Energy Society. [S.l.], p. 519. 2014.
- ISSICABA, D. et al. Agent-Based System Applied to Smart Distribution Grid Operation. **InTech**, 2012.
- JANDAN, F. et al. Recognition and classification of power quality disturbances by DWT-MRA and SVM classifier. **International Journal of Advanced Computer Science and Applications**, 2019. 368-377.
- KAMBLE, S.; NAIK, C. A.; KUNDU, P. Detection of simultaneous transient and harmonics disturbances employing discrete wavelet transform. **2013 Annual International Conference on Emerging Research Areas and 2013 International Conference on Microelectronics, Communications and Renewable Energy**, Junho 2013. 1-5.
- KAMTHEKAR, P. R.; MUNJE, R. K.; KUSHARE, B. E. Detection and classification of power quality events using DWT and MSD. **2017 International Conference on Innovative Mechanisms for Industry Applications (ICIMIA)**, 2017. 150-157.
- KEOW, C. H.; NALLAGOWNDEN, P.; RAO, K. R. Power quality problem classification based on Wavelet Transform and a Rule-Based method. **2010 IEEE International Conference on Power and Energy**, Novembro 2010. 677-682.
- KIM, H. et al. Power disturbance classifier using wavelet-based neural network. **2006 37th IEEE Power Electronics Specialists Conference**, Junho 2006. 1-6.
- KINDERMANN, G. **Curto-circuito**. 2ª. ed. Porto Alegre: Sagra Luzzatto, 1997.
- KINDERMANN, G. **Proteção de sistemas elétricos de potência**. Florianópolis: Editora da UFSC, 1999.

- LIM, J. S. et al. Digital signal processing. **Research Laboratory of Electronics (RLE) at the Massachusetts Institute of Technology (MIT)**, 1987.
- MAHELA, O. P.; SHAIK, A. G. Recognition of power quality disturbances using S-transform based ruled decision tree and fuzzy C-means clustering classifiers. **Applied Soft Computing**, 2019. 243-257.
- MAHMOUDI, A.; HOSSEINIAN, S. H.; DOROUDI, A. A new and fast method for detection of power quality disturbances using wavelet transform. **2010 First Power Quality Conference. IEEE**, 2010. 1-6.
- MALLAT, S. G. A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation. **IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence**, 1989. 674-693.
- MISITI, M. et al. **Wavelets and their Applications**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2013.
- MOKRYANI, G. et al. Detection of inrush current based on wavelet transform and LVQ neural network. **IEEE PES T&D 2010**, Abril 2010. 1-5.
- MORENO, H. **Harmônicas nas instalações elétricas: causas, efeitos e soluções**. [S.l.]: Procobre, 2001.
- MURUGAVEL, A. K. et al. Least-square estimation of average power in digital CMOS circuits. **IEEE transactions on very large scale integration (VLSI) systems**, 2002. 55-58.
- NICOLAE, I. D.; NICOLAE, P. M.; NICOLAE, M. S. Real-time analysis using discrete wavelet transform in power systems. **2012 15th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC)**, 2012. 3-8.
- OLIVEIRA, J. C. D. **Projeto SIDAQEE-Capítulo II Qualidade da Energia Elétrica: Definição e Análise dos Itens de Qualidade**. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2000.
- ONS. **Operador Nacional do Sistema Elétrico Submódulo 2.6 Requisitos mínimos para os sistemas de proteção e de telecomunicações**. Brasil: [s.n.], 2010.
- PHIPPS, J. K.; NELSON, J. P.; SEN, P. K. Power quality and harmonic distortion on distribution systems. **IEEE transactions on industry applications** **30**, 1994. 476-484.
- POLIKAR, R. **Fundamental concepts & an overview of the wavelet theory, THE WAVELET TUTORIAL**. [S.l.]: [s.n.], 1996.
- PUJANTARA, A. E. M. et al. Improvement of power quality monitoring based on modified S-transform. **2016 International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications**, Julho 2016. 539-544.
- RAHMAN, M. A.; JEYASURYA, B. A state-of-the-art review of transformer protection algorithms. **IEEE Transactions on power delivery**, 1988. 534-544.
- RASOULPOOR, M.; BANEJAD, M. A correlation based method for discrimination between inrush and short circuit currents in differential protection of power transformer using discrete wavelet transform: theory, simulation and experimental validation. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems** **51**, 2013. 168-177.
- RAZA, S. et al. Minimum-features-based ANN-PSO approach for islanding detection in distribution system. **IET Renewable Power Generation**, 2016. 1255-1263.

- RIBEIRO, M. V.; DECKMANN, S. M.; ROMANO, J. M. T. Adaptive filtering, wavelet and lapped transforms for power quality problem detection and identification. **2003 IEEE International Symposium on Industrial Electronics**, 2003. 301-306.
- SAHANI, M. et al. Detection and classification of power quality event using wavelet transform and weighted extreme learning machine. **2016 International Conference on Circuit, Power and Computing Technologies (ICCPCT)**, 2016. 1-6.
- SALEH, S. A.; RAHMAN, M. A. Off-line testing of a wavelet packet-based algorithm for discriminating inrush current in three-phase power transformers. **Large Engineering Systems Conference on Power Engineering**, 2003. 38-42.
- STEVENSON, W. D. **Elements of power system analysis**. New York: McGraw-Hill: [s.n.], v. 4, 1982.
- THANGARAJ, K. et al. Analysis of harmonics using wavelet technique. **International Journal of Electrical and Computer Engineering**, 2019. 1669.
- VASEGHI, S. V. **Advanced digital signal processing and noise reduction**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2008.
- WANG, J.; HAMILTON., R. Analysis of transformer inrush current and comparison of harmonic restraint methods in transformer protection. **2008 61st Annual Conference for Protective Relay Engineers**, 2008. 142-169.
- XIANGXUN, C. Wavelet-based detection, localization, quantification and classification of short duration power quality disturbances. **IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No. 02CH37309)**, 2002. 931-936.
- XU, Y.; ZHAO, Y. Identification of power quality disturbance based on short-term Fourier transform and disturbance time orientation by singular value decomposition. **Power System Technology**, 2011. 8.
- YABE, K. Power differential method for discrimination between fault and magnetizing inrush current in transformers. **IEEE Transactions on Power Delivery** **12**, 1997. 1109-1118.
- ZANG, H.; ZHAO, Y. Intelligent Identification System of Power Quality Disturbance. **2009 WRI Global Congress on Intelligent Systems**, 2009. 258-261.