

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

FILLEY HOFFMANN JAQUES

**UMA NOVA PROPOSTA PARA DETECÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE
FALTAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO**

Alegrete

2019

FILLEY HOFFMANN JAQUES

**UMA NOVA PROPOSTA PARA DETECÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE
FALTAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Machado dos Santos

Alegrete

2019

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

J36n Jaques, Filley Hoffmann
UMA NOVA PROPOSTA PARA DETECÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE FALTAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO / Filley Hoffmann Jaques.
58 p.

Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)-- Universidade Federal do Pampa, ENGENHARIA ELÉTRICA, 2019.
"Orientação: Eduardo machado Santos".

1. Sistemas elétrico de potência. 2. Detecção e classificação. 3. Eventos transitórios. I. Título.

FILLEY HOFFMANN JAQUES

UMA NOVA PROPOSTA PARA DETECÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE FALTAS EM LINHAS DE
TRANSMISSÃO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Sistemas Elétricos de Potência


Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 27 de junho de 2019.

Banca examinadora:



Prof. Dr. Eduardo Machado dos Santos

Orientador



Prof. Dr. Chrystian Dalla Lana da Silva

UNIPAMPA



Eng. Henrique Stein

RESUMO

Este trabalho introduz uma nova proposta para detecção e classificação de transitórios em sistemas elétricos de potência. A detecção desses eventos é realizada com base na variação da distância euclidiana entre dois pontos consecutivos nos planos formados pelos valores amostrados dos sinais de tensão e corrente, e suas respectivas funções-diferença. Para a respectiva classificação dos eventos, é proposta a utilização de uma lógica de decisão que verifica quais foram as variações nos planos, comparando-as com os padrões inerentes a cada tipo de transitório. Quando um padrão é verificado, é feita a classificação do evento. Esta lógica foi criada através da simulação de vários casos de diferentes eventos transitórios, as quais foram realizadas a partir da implementação de um sistema teste no software EMTP-ATP®. Assim, foram determinados os conjuntos de variações padrão nos planos para cada tipo de transitório, segundo simulações em Matlab®. Também, as lógicas de detecção e classificação dos eventos foram implementadas e testadas para o processamento dos sinais de um banco com 3381 casos simulados no software Matlab®. Por fim, destaca-se que os resultados obtidos através de simulações apontam para uma eficiência muito satisfatória para detecção e classificação dos eventos transitórios verificados.

Palavras-Chave: Detecção; Classificação; Sistema elétrico de potência; Evento transitório.

ABSTRACT

This paper presents a new proposal for detection and classification of transients in electrical power systems. The detection of these events is based on the variation of the Euclidean distance between two consecutive points in the planes formed by the sampled values of the voltage and current signals, and their respective different functions. For the respective classification of events, it is proposed to use a decision logic that verifies the variations in the plans, comparing them with the standards inherent to each type of transient. When a pattern is checked, the event is sorted. This logic was created through the simulation of several cases of different transient events, which were performed from the implementation of a test system in the EMTP-ATP® software. Thus, the sets of standard variations in the planes were determined for each type of transient, according to simulations in Matlab®. Also, the logics of event detection and classification were implemented and tested for the processing of signals from a bank with 3381 simulated cases in Matlab® software. Finally, it should be noted that the results obtained through simulations point to a very satisfactory efficiency for the detection and classification of verified transient events.

Keywords: Detection; Classification; Electric power system; Transient event.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Comportamento corrente de curto-circuito.	19
Figura 2 – Tipos de curtos-circuitos.	19
Figura 3 – Exemplo de formas de onda para CC1Ø-g na fase A. (a) Ondas de tensão. (b) Ondas de corrente.	20
Figura 4 – Exemplo de formas de onda para CC2Ø entre as fases A e B. (a) Ondas de tensão (b) Ondas de corrente.	20
Figura 5 – Exemplo de formas de onda para CC2Ø-g entre as fases A e B. (a) Ondas de tensão. (b) Ondas de corrente.	21
Figura 6 – Exemplos de formas de onda para CC3Ø (ABC). (a) Ondas de tensão (b) Ondas de corrente.	22
Figura 7 – Exemplo de formas de onda para abertura monopolar na fase A. (a) ondas de tensão (b) Ondas de corrente.	23
Figura 8 – Exemplo de formas de onda para abertura bipolar envolvendo as fases A e B. (a) Ondas de tensão. (b) Ondas de corrente.	23
Figura 9 – Exemplo de formas de onda para da abertura tripolar. (a) Ondas de tensão. (b) Ondas de corrente.	24
Figura 10 – Exemplos de formas de onda para entrada de carga na fase A. (a) Ondas de tensão. (b) Ondas de corrente.	24
Figura 11 – Exemplos de formas de onda para entrada de carga nas fases A e B. (a) Ondas de tensão. (b) Ondas de corrente.	25
Figura 12 – Exemplo de formas de onda para entrada de carga nas fases A, B e C. (a) Ondas de tensão. (b) Ondas de corrente.	25
Figura 13 – Curva de magnetização do transformador.	26
Figura 14 – Exemplo de formas de onda para energização do transformador (a) tensão (b) corrente.	27
Figura 15 – Diferença entre os pontos de um sinal de amostragem.	28
Figura 16 – Pontos que resultam da função diferença calculada para a fase A de um sinal de corrente.	29
Figura 17 – Distância nos planos para as correntes das três fases do sistema e estados dos detectores de transitório.	30
Figura 18 – Fluxograma da metodologia proposta.	31

Figura 19 – Sistema teste.	37
Figura 20 – Curva de saturação do transformador estudado.	39
Figura 21 – Formas de onda para CC3Ø (ABC) no primeiro terminal. (a) Ondas de tensão. (b) Ondas de corrente.	40
Figura 22 – Formas de onda para CC3Ø (ABC) no segundo terminal. (a) Ondas de tensão. (b) Ondas de corrente.	40
Figura 23 – Variação das distâncias euclidianas para os sinais de corrente e estado dos detectores para CC3Ø no primeiro terminal.	41
Figura 24 – Variação das distâncias euclidianas para os sinais de tensão e estado dos detectores para CC3Ø no primeiro terminal.	41
Figura 25 – Variação das distâncias euclidianas para os sinais de corrente e estado dos detectores para CC3Ø no segundo terminal.	42
Figura 26 – Variação das distâncias euclidianas para os sinais de tensão e estado dos detectores para CC3Ø no segundo terminal.	42
Figura 27 – Formas de onda para abertura monopolar no primeiro terminal. (a) Ondas de tensão. (b) Ondas de corrente.	43
Figura 28 – Formas de onda para abertura monopolar no segundo terminal. (a) Ondas de tensão. (b) Ondas de corrente.	44
Figura 29 – Variação das distâncias euclidianas para os sinais de corrente e estado dos detectores para abertura monopolar no primeiro terminal.	44
Figura 30 – Variação das distâncias euclidianas para os sinais de tensão e estado dos detectores para abertura monopolar no primeiro terminal.	45
Figura 31 – Variação das distâncias euclidianas para os sinais de corrente e estado dos detectores para abertura monopolar no segundo terminal.	45
Figura 32 – Variação das distâncias euclidianas para os sinais de tensão e estado dos detectores para abertura monopolar no segundo terminal.	46
Figura 33 – Formas de onda para entrada de carga na fase A no primeiro terminal. (a) Ondas de tensão. (b) Ondas de corrente.	47
Figura 34 – Formas de onda para entrada de carga na fase A no segundo terminal. (a) Ondas de tensão. (b) Ondas de corrente.	47
Figura 35 – Variação das distâncias euclidianas para os sinais de corrente e estado dos detectores para entrada de carga na fase A no primeiro terminal.	48

Figura 36 – Variação das distâncias euclidianas para os sinais de tensão e estado dos detectores para entrada de carga na fase A no primeiro terminal.	48
Figura 37 – Variação das distâncias euclidianas para os sinais de corrente e estado dos detectores para entrada de carga na fase A no segundo terminal.	49
Figura 38 – Variação das distâncias euclidianas para os sinais de tensão e estado dos detectores para entrada de carga na fase A no segundo terminal.	49
Figura 39 – Formas de onda para energização do transformador no primeiro terminal. (a) Ondas de tensão. (b) Ondas de corrente.	50
Figura 40 – Formas de onda para energização do transformador no segundo terminal. (a) Ondas de tensão. (b) Ondas de corrente.	50
Figura 41 – Variação das distâncias euclidianas para os sinais de corrente e estado dos detectores para energização do transformador no primeiro terminal.	51
Figura 42 – Variação das distâncias euclidianas para os sinais de tensão e estado dos detectores para energização do transformador no primeiro terminal.	51
Figura 43 – Variação das distâncias euclidianas para os sinais de corrente e estado dos detectores para energização do transformador no segundo terminal.	52
Figura 44 – Variação das distâncias euclidianas para os sinais de tensão e estado dos detectores para energização do transformador no segundo terminal.	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Padrão de patamares para corrente em curtos-circuitos.	34
Tabela 2 – Padrão de patamares para corrente em entradas de carga.	35
Tabela 3 – Padrão de patamares para tensão em entradas de carga.	35
Tabela 4 – Padrão de patamares para corrente em energizações do transformador.	35
Tabela 5 – Padrão de patamares para tensão em energizações do transformador.	36
Tabela 6 – Parâmetros do sistema utilizado para simulações.	38
Tabela 7 – Performance do algoritmo proposto para diferentes tipos de transitórios.	53
Tabela 8 – Performance do algoritmo proposto para diferentes tipos de resistência de falta.	53
Tabela 9 – Performance do algoritmo proposto para diferentes tipos de transitórios.	54
Tabela 10 – Comparação com outros métodos.	54

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

UNIPAMPA – Universidade Federal do Pampa

SEP – Sistema Elétrico de Potência

EMTP – *Electromagnetic Transients Program*

ATP – *Alternative Transient Program*

Ag – Curto-circuito monofásico na fase A

Bg – Curto-circuito monofásico na fase B

Cg – Curto-circuito monofásico na fase C

AB – Curto-circuito bifásico entre as fases A e B

AC – Curto-circuito bifásico entre as fases A e C

BC – Curto-circuito bifásico entre as fases B e C

AB-g – Curto-circuito bifásico terra entre as fases A e B

AC-g – Curto-circuito bifásico terra entre as fases A e C

BC-g – Curto-circuito bifásico terra entre as fases B e C

ABC/ABC-g – Curto-circuito trifásico

CC1Ø-g – Curto-circuito monofásico

CC2Ø-g – Curto-circuito bifásico terra

CC2Ø – Curto-circuito bifásico

CC3Ø-g – Curto-circuito trifásico

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Considerações Gerais.....	15
1.2 Motivação.....	16
1.3 Objetivos.....	16
1.4 Estrutura do trabalho.....	16
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1 Considerações Gerais.....	18
2.2 Distúrbios transitórios	18
2.2.1 Curto-circuito	18
2.2.1.1 Curto-circuito monofásico.....	19
2.2.1.1 Curto-circuito bifásico.....	20
2.2.1.1 Curto-circuito bifásico terra.....	21
2.2.1.1 Curto-circuito trifásico.....	21
2.2.2 Aberturas de fases	22
2.2.3 Entradas de carga.....	24
2.2.4 Energização de transformadores.....	26
2.3 Considerações Finais	27
3 METODOLOGIA	28
3.1 Metodologia proposta por Deliberalli (2014).....	28
3.2 Metodologia proposta	30
3.2.1 Detecção de transitórios.....	32
3.2.2 Patamares estabelecidos	32
3.2.3 Classificação de transitórios.....	33
3.2.4 Lógicas para classificação dos transitórios	33
3.2.4.1 Lógica para classificação de curtos-circuitos	34

3.2.4.2 Lógica para classificação de aberturas de fases	34
3.2.4.3 Lógica para classificação de entradas de carga.....	34
3.2.4.4 Lógica para classificação de energização de transformadores	35
3.3 Considerações Finais	36
4 ANÁLISE E RESULTADOS.....	37
4.1 Considerações Gerais.....	37
4.2 Sistema teste	37
4.2.1 Curtos-circuitos.....	38
4.2.2 Aberturas de linhas.....	38
4.2.3 Entrada de carga.....	38
4.2.4 Energizações de transformadores.....	39
4.3 Resultados	39
4.3.1 Caso 1 – Curto-circuito trifásico.....	39
4.3.2 Caso 2 – Abertura monopolar	43
4.3.3 Caso 3 – Entrada de carga monofásica	46
4.3.4 Caso 4 – Energização de transformador	50
4.2.5 Resultados da classificação com medição em um terminal	53
4.2.6 Resultados da classificação com medição nos dois terminais	53
4.4 Comparação com outros métodos	54
4.5 Considerações Finais	55
5 Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros	56
5.1 Conclusões	56
5.2 Sugestões para trabalhos futuros	56
REFERÊNCIAS BIBLIGRÁFICAS.....	57

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Gerais

Os sistemas elétricos de potência são de extrema importância e se fazem necessários para o transporte de energia. Por sua vez, o sistema de proteção é responsável pela integridade dos equipamentos dos sistemas elétricos de potência, eliminando curtos-circuitos e desligando trechos comprometidos da rede. Com isso, a má detecção e classificação de transitórios pode ocasionar desligamento desnecessário do sistema, tornando-se essencial o desenvolvimento de metodologias capazes de prover detecções e classificações dos eventos causadores de forma rápida e precisa.

Métodos para detecção e classificação de faltas têm sido estudados intensamente ao longo dos anos. Com a relevância de redes inteligentes aumentando, obter um sistema capaz de classificar faltas se torna essencial. Nesse contexto, ressalta-se que, com o avanço nas técnicas de processamento de sinais e na redução de restrições para se adquirir dados, um avanço rápido nas áreas relacionadas à detecção e classificação de faltas vem ocorrendo, conforme é relatado em Chen et al. (2016).

A maior parte dos trabalhos realizados nesta área utilizam um método fundamentado em redes neurais artificiais (VYAS et al., 2016), transformada Wavelet (MALATHI et al., 2011), transformada Wavelet e lógica Fuzzy (ERISTI, 2013) ou em máquinas de vetores de suporte, as quais são conhecidas como SVM (PARIKH et al., 2010).

Sendo assim, este trabalho apresenta um algoritmo implementado no *software* MATLAB® capaz de detectar e classificar curtos-circuitos, bem como outros eventos transitórios. A detecção é feita a partir da variação da distância euclidiana entre dois pontos consecutivos nos planos formados pelos valores amostrados dos sinais de tensão e corrente e suas respectivas funções-diferença.

Para a classificação dos eventos transitórios, é utilizada uma lógica que verifica a combinação de quais planos tiveram patamares pré-estabelecidos ultrapassados para a distância entre pontos consecutivos após a detecção. Para tal, foi observado que há um padrão de violações dos referidos patamares para cada tipo de transitório, estabelecendo-se assim uma lógica para a classificação. Tal lógica foi desenvolvida a partir da simulação de uma grande gama de faltas e

eventos comuns no Sistema Elétrico de Potência (SEP) em um sistema teste implementado no *software* EMTP-ATP®.

A metodologia proposta apresentou excelente desempenho, detectando e classificando corretamente grande parcela dos transitórios simulados, mostrando-se ser uma ferramenta eficaz e de baixo custo computacional para aplicação em tempo real.

1.2 Motivação

Tendo em vista os inúmeros fatores que afetam a eficácia dos métodos existentes para detecção e classificação, faz-se necessário à continua pesquisa nessa área em busca de uma proposta mais eficiente que possua uma fácil aplicação na prática. Por fim, é importante ressaltar que um método mais eficaz auxilia as equipes de manutenção a retomar a operação em um curto espaço de tempo.

1.3 Objetivos

O objetivo desse trabalho é propor um aprimoramento na técnica para detecção e classificação proposta por Deliberalli (2014). Por objetivos específicos citam-se:

- Estudar técnicas de processamento de sinais e metodologias específicas para detecção e classificação de transitórios em sistemas elétricos de potência;
- Implementar sistema teste e simular diferentes casos de eventos transitórios no *software* EMTP-ATP®, formando um banco de sinais;
- Analisar o comportamento das formas de onda de sinais de tensão e corrente simulados;
- Implementar a nova técnica no *software* MATLAB®, para processar as formas de onda do banco de sinais;
- Analisar os resultados e o desempenho da técnica proposta.

1.4 Estrutura do trabalho

Este trabalho está estruturado da seguinte forma: No Capítulo 2 serão apresentados a fundamentação teórica dos principais temas abordados. A partir disso, serão apresentados os principais trabalhos relacionados com o tema, possibilitando a elaboração da técnica proposta.

No Capítulo 3 será apresentado a metodologia proposta neste trabalho.

No Capítulo 4 são apresentadas a análises e discussões sobre os resultados obtidos.

Por fim, o Capítulo 5 apresenta as conclusões deste trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Considerações Gerais

Neste Capítulo, é realizada uma breve abordagem sobre os distúrbios transitórios e sobre métodos usados para detecção e classificação dos mesmos. É demonstrado que os distúrbios transitórios são realmente um problema para o SEP, o que faz com que uma grande quantidade de trabalhos seja realizada nessa área, em busca de uma melhor detecção e classificação desses eventos.

2.2 Distúrbios transitórios

Os distúrbios em sistemas elétricos são classificados principalmente como fenômenos de estado estacionário e transiente (KIM, 2004). Os eventos transitórios causados por curtos-circuitos representam importantes perturbações do sistema, uma vez que podem causar falta de energia com várias consequências (SILVA, 2010).

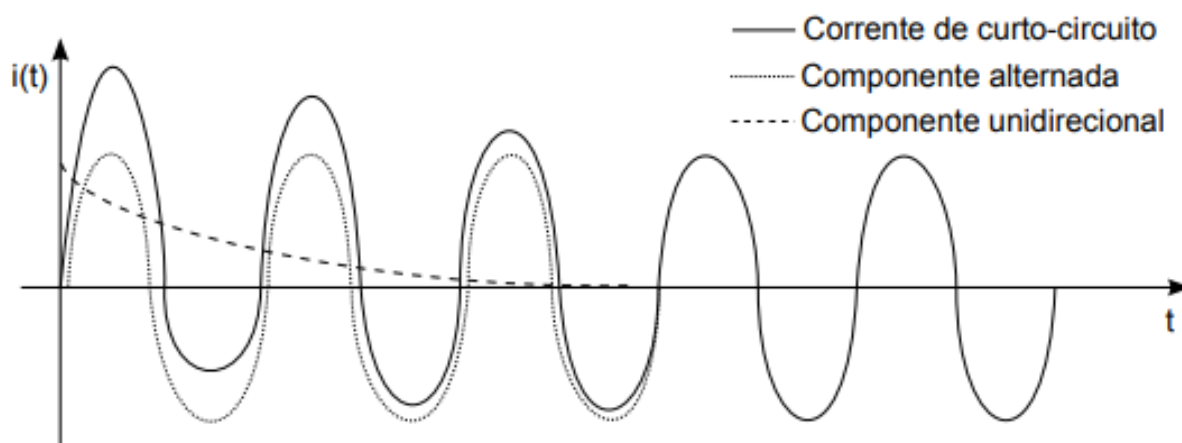
Os transientes em um sistema elétrico de potência são, em sua maioria, comutações de corte e entrada de carga, energizações de transformadores e fusíveis e disjuntores que interrompem altas correntes devido à ocorrência de faltas.

2.2.1 Curto-circuito

Os curtos-circuitos são um dos mais prejudiciais transitórios que podem ocorrer no SEP, pois ocorrem de maneira aleatória e suas consequências podem ser extremamente danosas se não forem eliminados rapidamente pelos dispositivos de proteção. Para isso, os dispositivos de proteção devem ser extremamente velozes e os equipamentos de manobra devem ter capacidade adequada para operar em condições extremas de corrente (FILHO, MAMEDE, 2011).

Nos instantes seguintes do surgimento do curto-circuito é visível uma componente DC na corrente que faz com que o sinal apresente uma assimetria por um período como é mostrado na Figura 1.

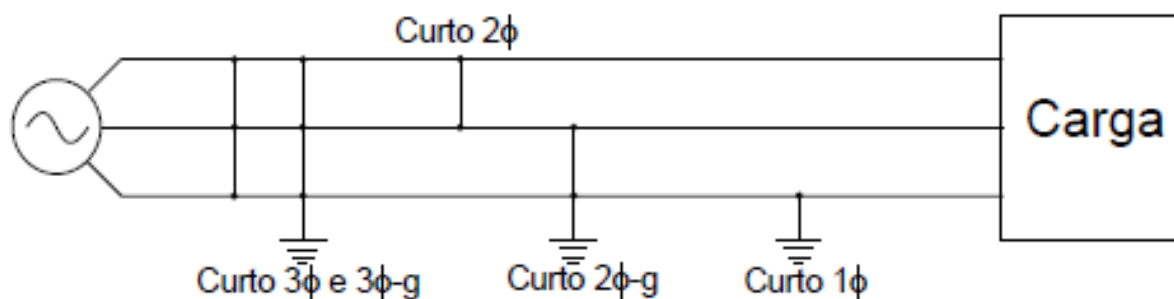
Figura 1 – Comportamento corrente de curto-circuito.



Fonte: Deliberalli (2014).

Na Figura 2 é mostrado uma representação simples do SEP, onde aparece uma carga conectada a um gerador, também é apresentada as quatro categorias de curtos-circuitos.

Figura 2 – Tipos de curtos-circuitos.

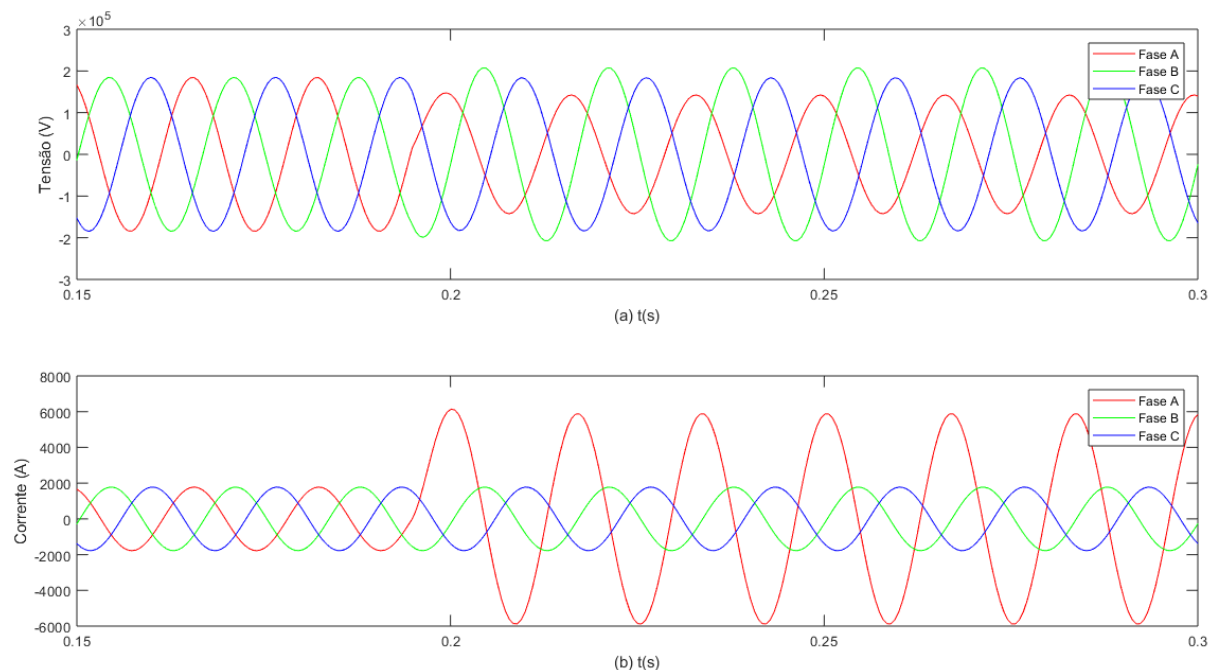


Fonte: Deliberalli (2014).

2.2.1.1 Curto-circuito monofásico

Curto-circuito monofásico (CC1Ø-g), é um curto assimétrico, ou seja, desequilibrado, que envolve uma das fases do sistema e a terra. Na Figura 3 está representado o exemplo dos sinais de corrente e tensão tomados nos terminais do gerador para um CC1Ø-g na fase A.

Figura 3 – Exemplo de formas de onda para CC1Ø-g na fase A. (a) Ondas de tensão. (b) Ondas de corrente.

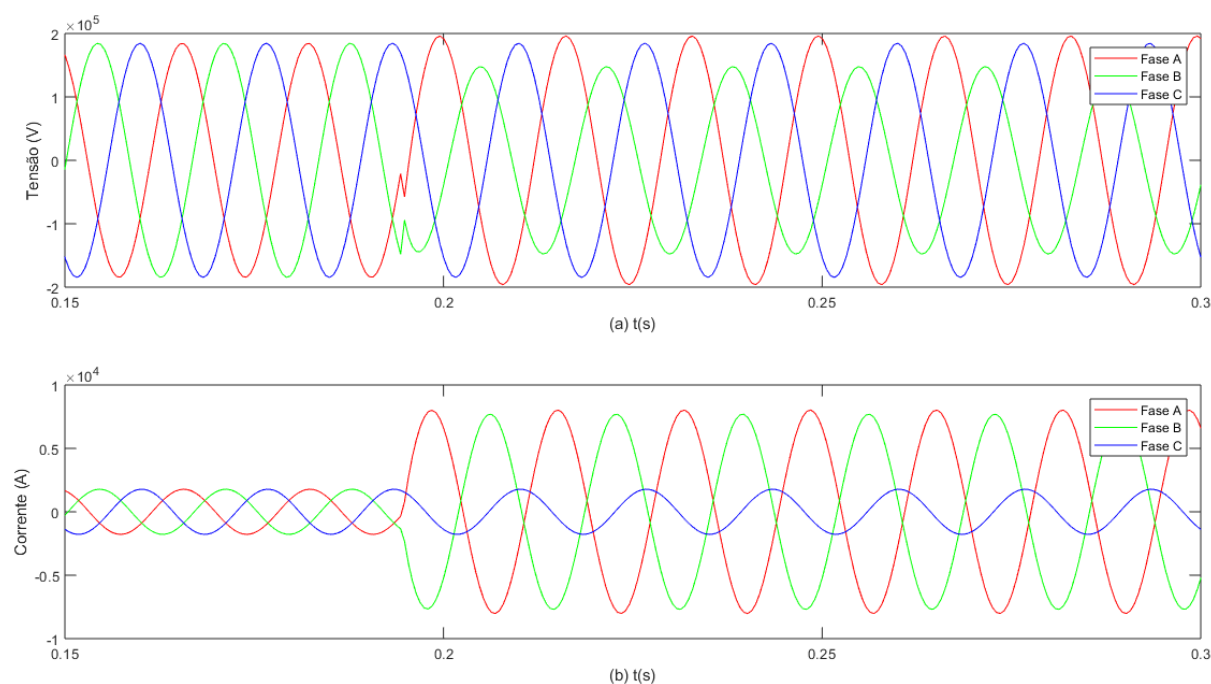


Fonte: Elaborado pelo autor.

2.2.1.1 Curto-circuito bifásico

Curto-circuito bifásico (CC2Ø), é um curto assimétrico que envolve duas das fases do sistema. Na Figura 4 está representado o exemplo dos sinais de corrente e tensão tomados nos terminais do gerador para um CC2Ø entre as fases A e B.

Figura 4 – Exemplo de formas de onda para CC2Ø entre as fases A e B. (a) Ondas de tensão (b) Ondas de corrente.

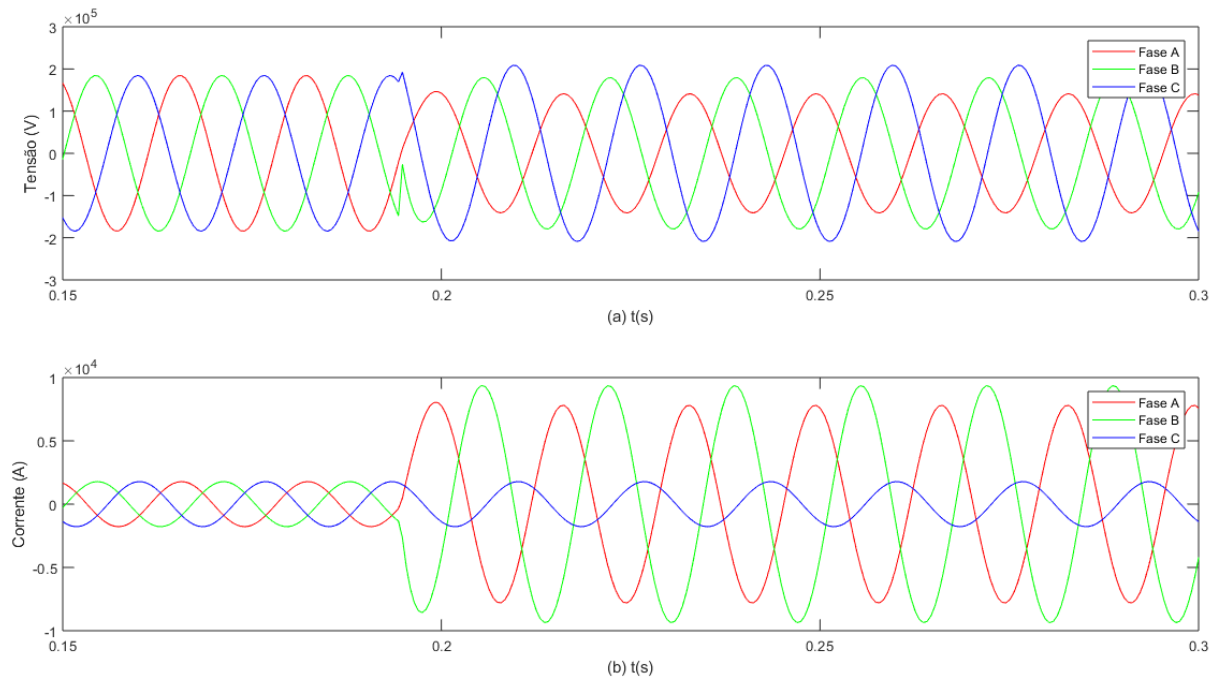


Fonte: Elaborado pelo autor.

2.2.1.1 Curto-circuito bifásico terra

Curto-circuito bifásico terra (CC2Ø-g), é um curto assimétrico que envolve duas das fases do sistema e a terra. Na Figura 5 está representado o exemplo dos sinais de corrente e tensão tomados nos terminais do gerador para um CC2Ø-g entre as fases A e B.

Figura 5 – Exemplo de formas de onda para CC2Ø-g entre as fases A e B. (a) Ondas de tensão. (b) Ondas de corrente.

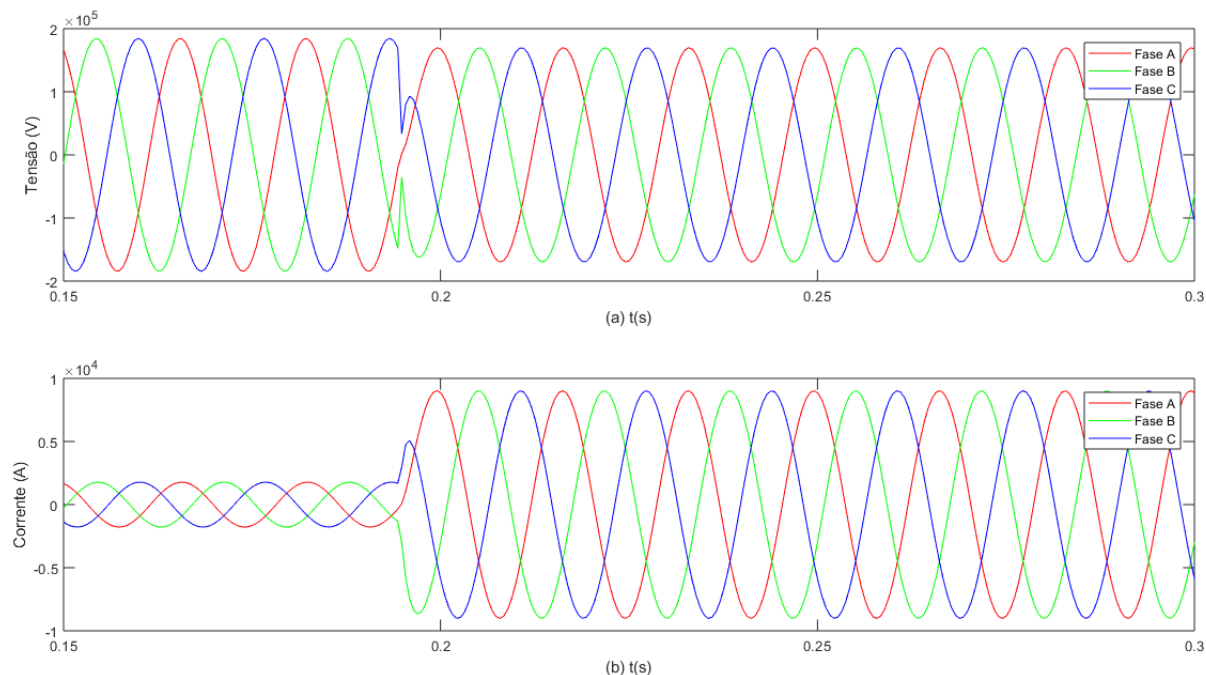


Fonte: Elaborado pelo autor.

2.2.1.1 Curto-circuito trifásico

Curto-circuito trifásico (CC3Ø), envolve as três fases do sistema e pode ou não envolver a terra. Na Figura 6 está representado o exemplo dos sinais de corrente e tensão tomados nos terminais do gerador para um CC3Ø.

Figura 6 – Exemplos de formas de onda para CC3Ø (ABC). (a) Ondas de tensão (b) Ondas de corrente.



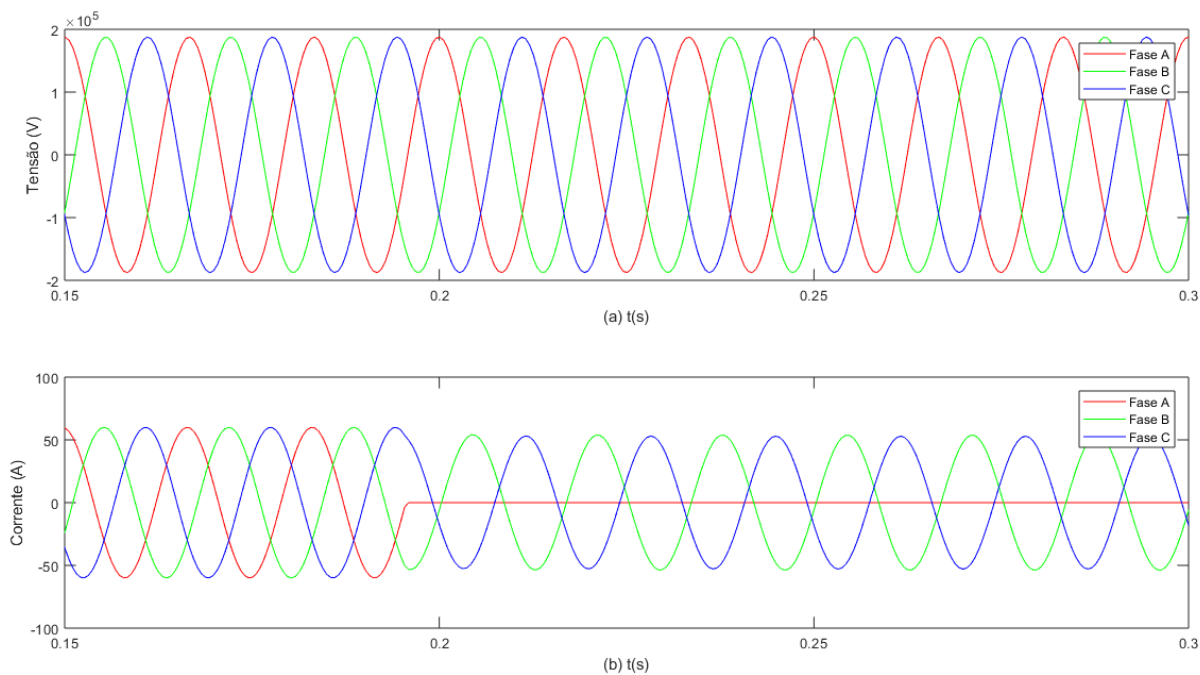
Fonte: Elaborado pelo autor.

2.2.2 Aberturas de fases

As aberturas de fases são causadas por defeitos em fusíveis, podendo ocorrer em uma ou mais fases, mantendo as fases que não foram afetadas funcionando. Pode ocasionar um desbalanceamento nas fases que não foram afetadas, reduzindo sua corrente.

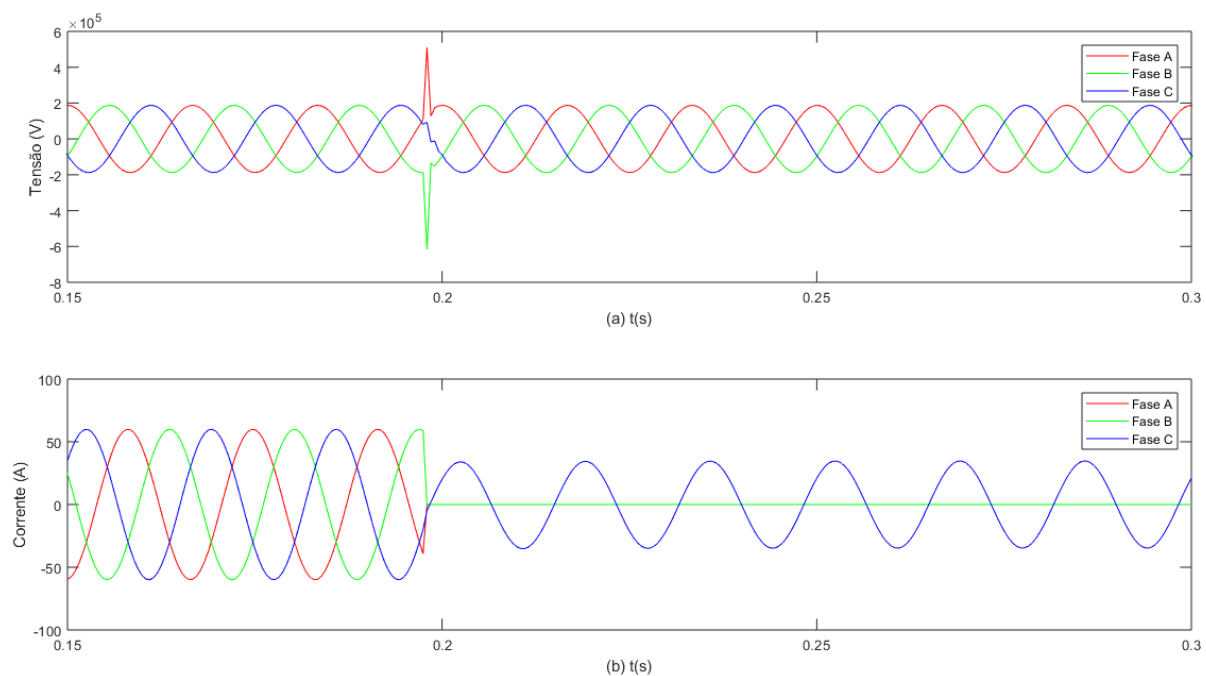
Nas Figuras 7 a 9 estão representados exemplos dos sinais de correntes e tensões para situações de abertura nas fases A, AB e ABC, respectivamente. É possível notar que as correntes que foram abertas se tornam praticamente zero e as tensões no momento de abertura sofre um pico que é causado pela abertura abrupta do sistema.

Figura 7 – Exemplo de formas de onda para abertura monopolar na fase A. (a) ondas de tensão (b) Ondas de corrente.



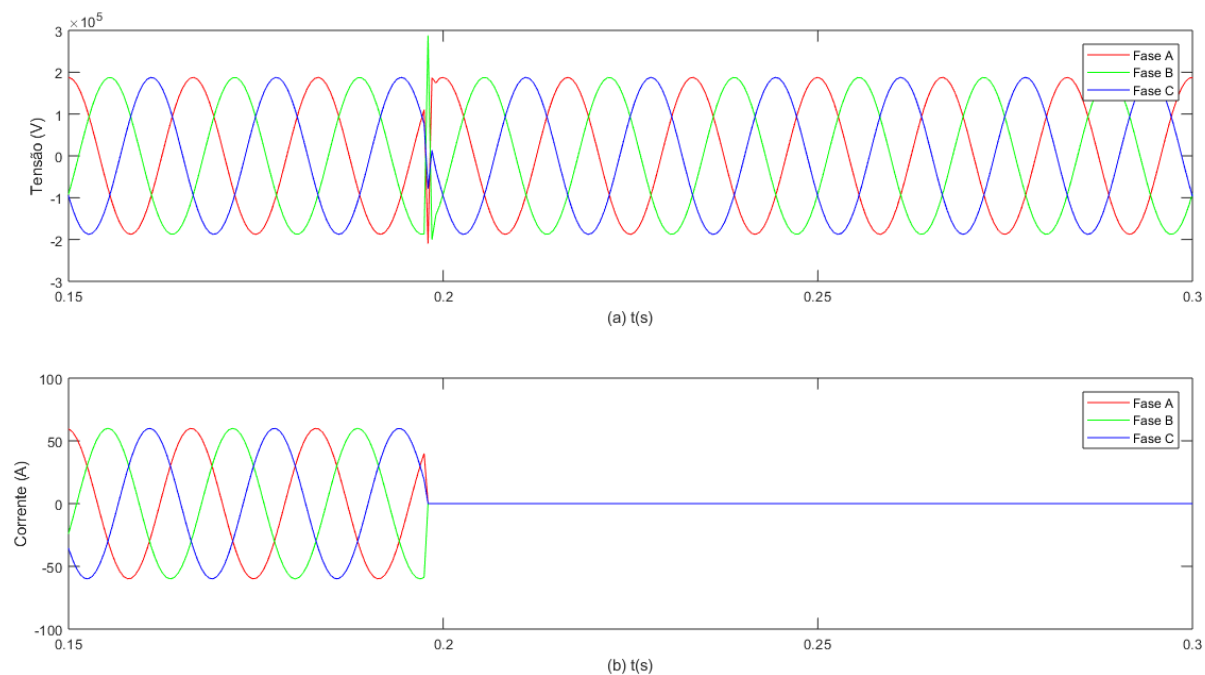
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 8 – Exemplo de formas de onda para abertura bipolar envolvendo as fases A e B. (a) Ondas de tensão. (b) Ondas de corrente.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 9 – Exemplo de formas de onda para da abertura tripolar. (a) Ondas de tensão. (b) Ondas de corrente.

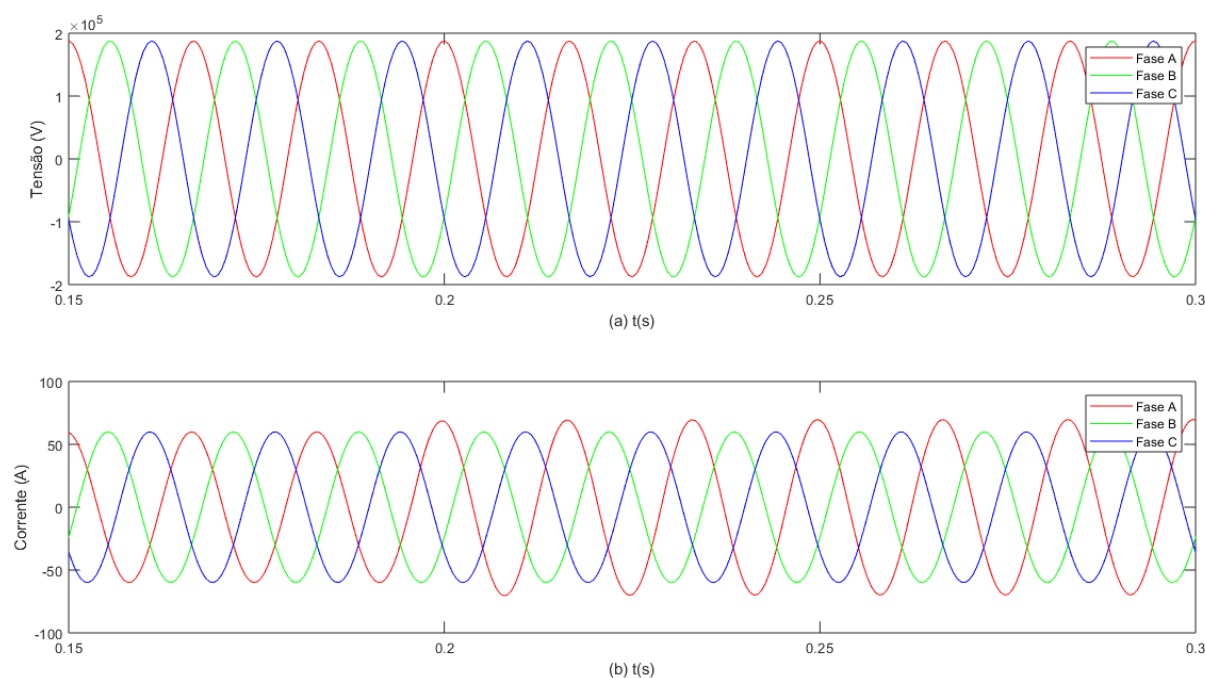


Fonte: Elaborado pelo autor.

2.2.3 Entradas de carga

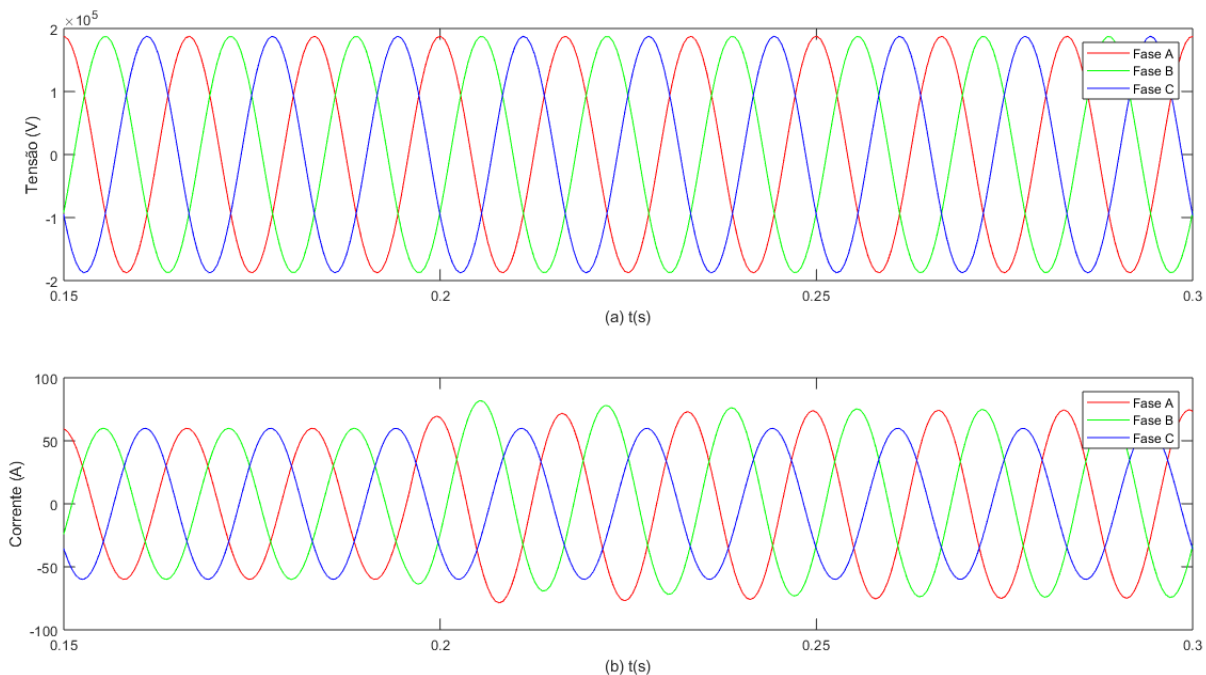
As entradas de carga são uma operação muito comum no SEP. Nas Figuras 10 a 12, estão representados exemplos dos sinais de corrente e tensão resultantes de entradas de carga nas A, AB e ABC, respectivamente.

Figura 10 – Exemplos de formas de onda para entrada de carga na fase A. (a) Ondas de tensão. (b) Ondas de corrente.



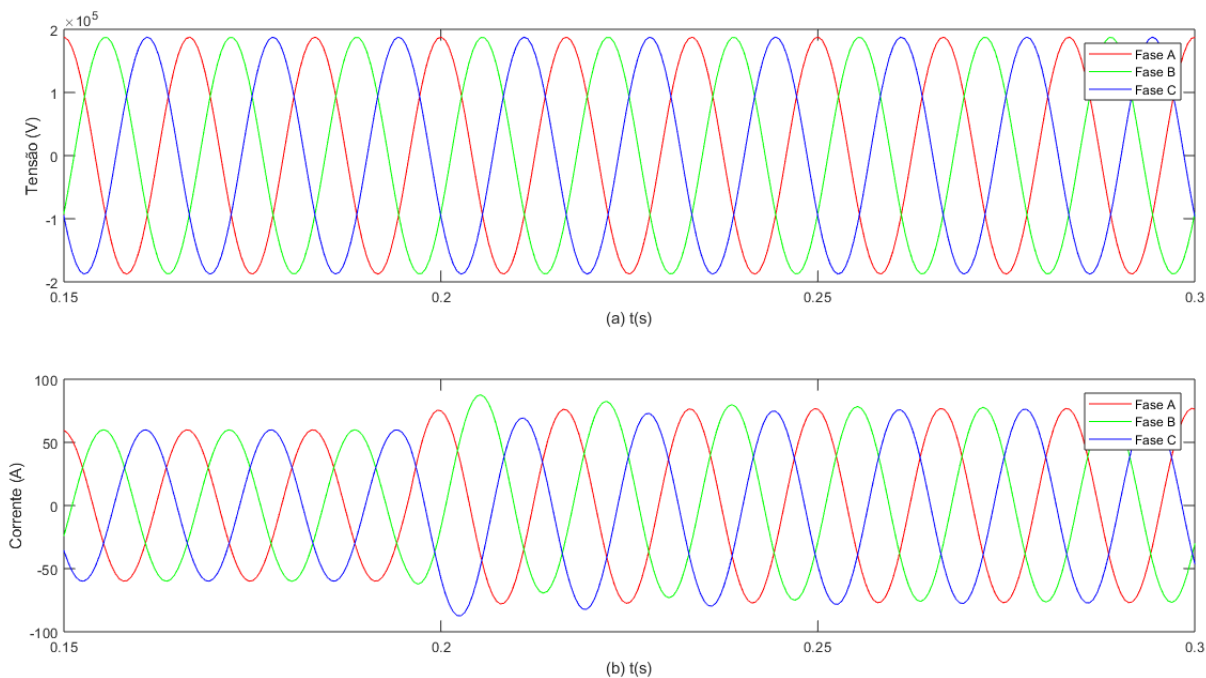
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 11 – Exemplos de formas de onda para entrada de carga nas fases A e B. (a) Ondas de tensão. (b) Ondas de corrente.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 12 – Exemplo de formas de onda para entrada de carga nas fases A, B e C. (a) Ondas de tensão. (b) Ondas de corrente.

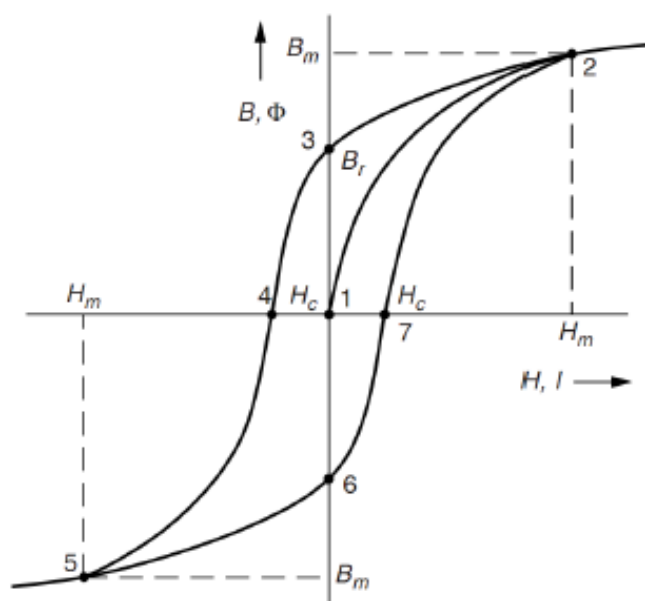


Fonte: Elaborado pelo autor.

2.2.4 Energização de transformadores

O processo de energização de transformadores também é um evento transitório interessante para se classificar, pois no momento da energização do transformador surge a corrente *inrush*. O principal problema da energização de transformadores se dá pela corrente de *inrush* e pelas harmônicas geradas por ela, com predomínio da segunda harmônica. A magnitude da corrente de *inrush* é determinada pela declividade da curva característica de magnetização na região saturada podendo chegar de 8 a 12 vezes a corrente nominal do transformador. Na Figura 13 pode ser observado que do ponto inicial (1) até o ponto (2) necessita-se de uma grande corrente para um pequeno aumento de fluxo.

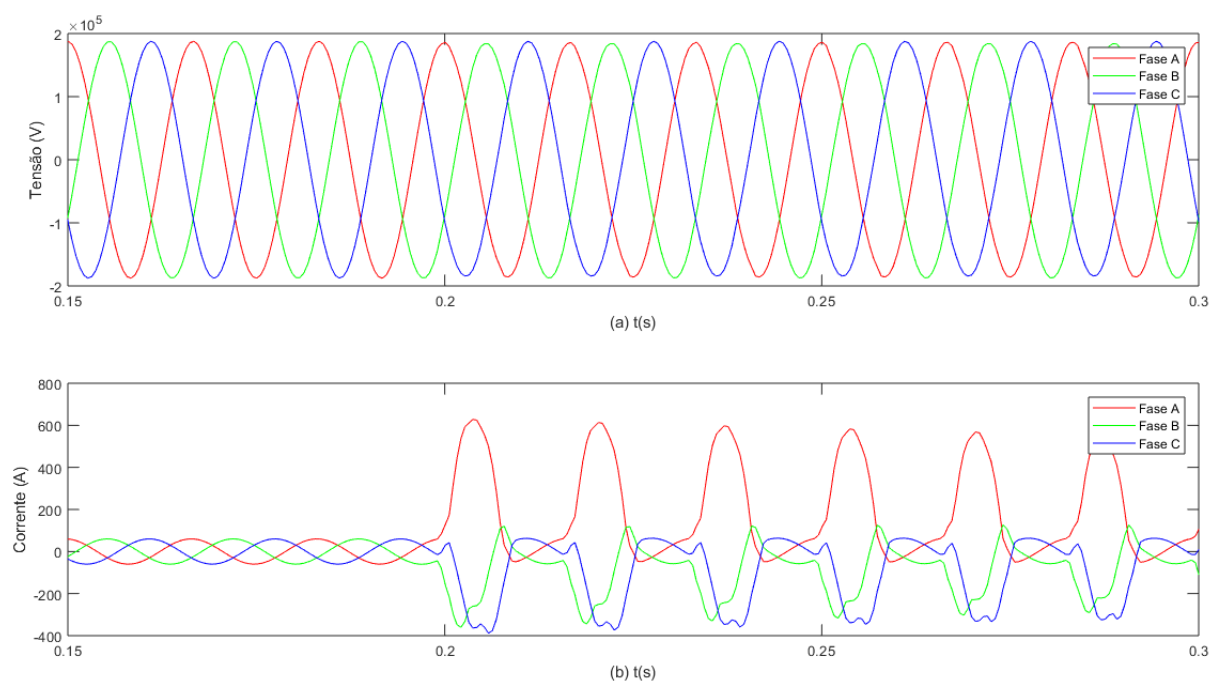
Figura 13 – Curva de magnetização do transformador.



Fonte: Sluis (2001)

Na Figura 14, estão representados exemplos dos sinais de corrente e tensão para um caso de energização do transformador.

Figura 14 – Exemplo de formas de onda para energização do transformador (a) tensão (b) corrente.



Fonte: Elaborado pelo autor.

2.3 Considerações Finais

Neste Capítulo fez-se uma breve revisão bibliográfica dos principais conceitos acerca dos eventos transitórios aos quais o SEP é suscetível.

No Capítulo seguinte, será abordado a metodologia que foi usada neste trabalho para detectar e classificar eventos transitórios.

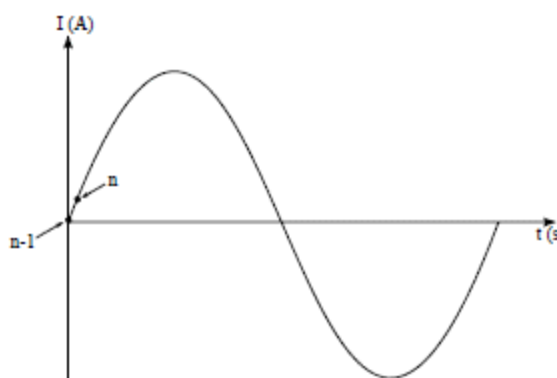
3 METODOLOGIA

Nesse Capítulo, apresenta-se a metodologia para detecção e classificação de transitórios, usando os conceitos da função-diferença. Trata-se de uma adaptação da proposta apresentada por Deliberalli (2014), a qual destina-se à classificação de transitórios. Os aprimoramentos aqui apresentados melhoram a precisão do método em relação à proposta original e outros métodos pesquisados recentemente. Ressalta-se que a técnica é capaz de diferenciar se o transitório ocorrido é uma falta ou uma operação normal do sistema elétrico.

3.1 Metodologia proposta por Deliberalli (2014)

A metodologia proposta por Deliberalli (2014) se baseia no cálculo das funções-diferença para os sinais de corrente e tensão. A função diferença de um sinal de corrente representado na Figura 15 é descrito pela Equação 1. A distribuição dos pares ordenados formados pelos valores da primeira função-diferença e o valor de dado sinal para a amostra atual n gera planos, onde a distribuição dos pontos para um determinado sinal apresenta caminho com comportamento característico para o sistema operando em regime e variações bruscas quando da ocorrência de transitórios. Assim, são considerados planos para cada sinal de tensão e corrente, com o intuito de determinar a ocorrência de um transitório, bem como estabelecer a classificação desse evento.

Figura 15 – Diferença entre os pontos de um sinal de amostragem.



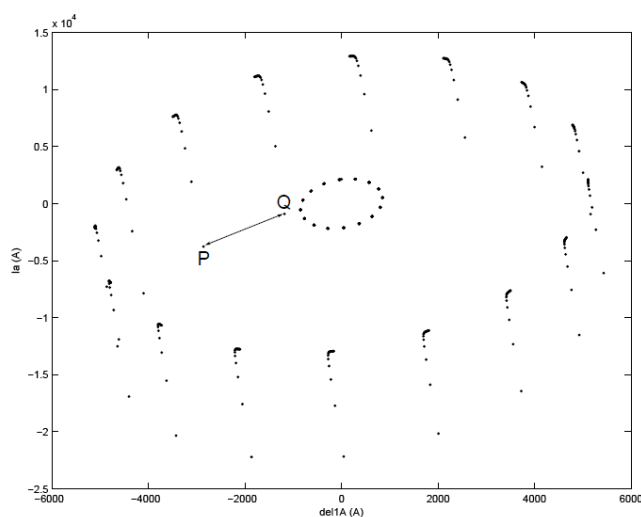
Fonte: Deliberalli (2014).

$$del1A(n,1) = Ia(n,1) - Ia(n-1,1) \quad (1)$$

Em (1), $I_a(n)$ representa o valor amostrado do sinal de corrente da fase A para a amostra atual n . É importante destacar que, para os sinais de corrente e demais sinais de tensão, as respectivas funções-diferença são calculadas de forma análoga ao descrito em (1).

Posteriormente, para cada plano, sendo um dos planos considerados representado na Figura 16. Considerando dois pontos consecutivos os quais são representados na Figura 16 como “P” e “Q” é calculada a distância euclidiana de acordo com a Equação 2 para cada um dos planos considerados.

Figura 16 – Pontos que resultam da função diferença calculada para a fase A de um sinal de corrente.

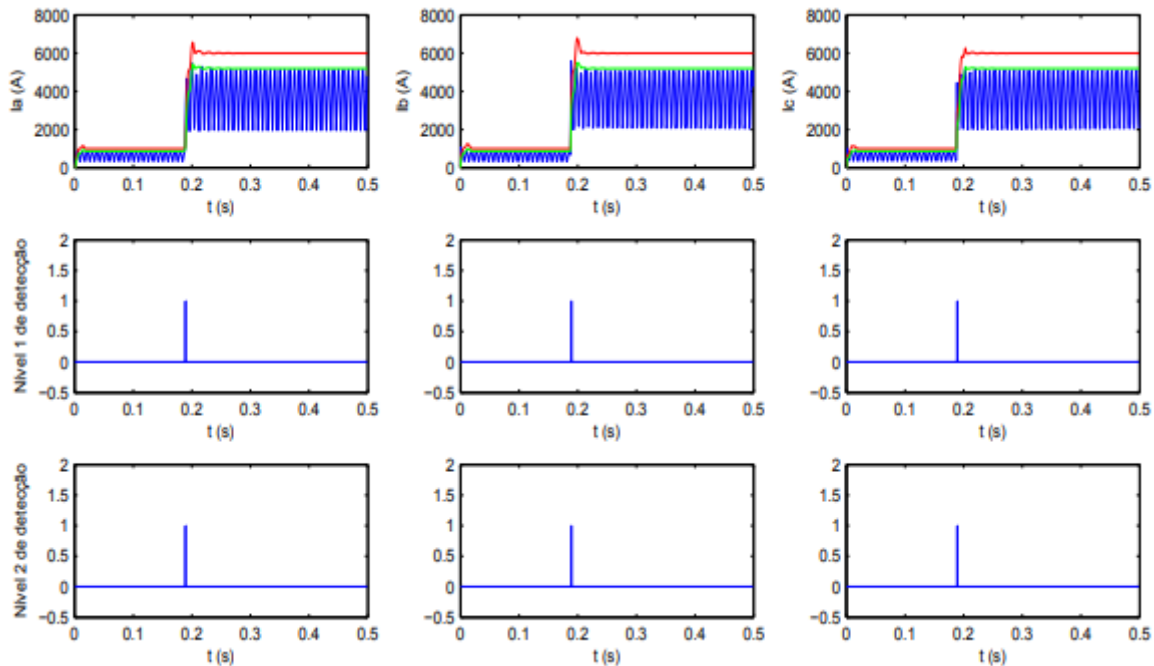


Fonte: Deliberalli (2014).

$$D(n) = \sqrt{(P_x - Q_x)^2 + (P_y - Q_y)^2} \quad (2)$$

Após a realização dos cálculos das distâncias euclidianas, são estabelecidos dois níveis de detecção, sendo um nível inferior representado pela função na cor verde e um superior representado pela função vermelha conforme a Figura 17. Sendo a função azul o resultado das distâncias euclidianas.

Figura 17 – Distância nos planos para as correntes das três fases do sistema e estados dos detectores de transitório.



Fonte: Deliberalli (2014).

Os níveis inferior e superior são mostrados respectivamente através das Equações 3 e 4. Onde μ e σ representam, respectivamente, a média e o desvio padrão para o conjunto dentro da janela de dados correspondente, a qual é composta por 16 amostras do sinal analisado.

$$N_1(n) = \mu(jan_i(n)) + 1,3 * \sigma(jan_i(n)) \quad (3)$$

$$N_2(n) = \mu(jan_i(n)) + 2 * \sigma(jan_i(n)) \quad (4)$$

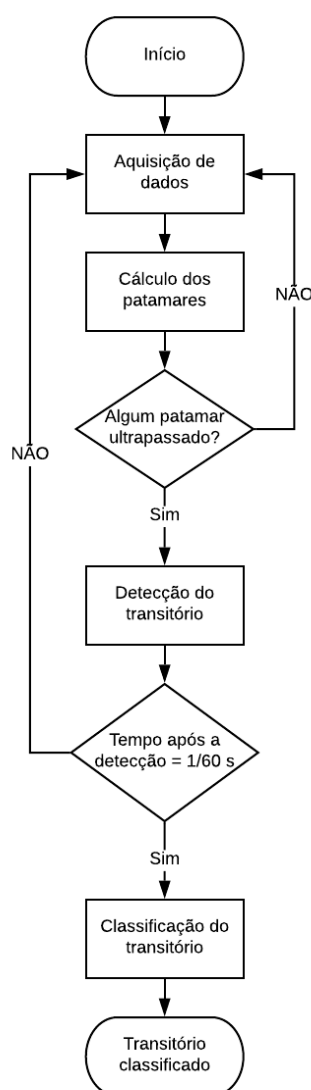
Dessa forma, caso haja uma variação da referida distância em pelo menos um dos planos, a qual ultrapasse um dos dois limites estabelecidos, o estado do detector associado àquele plano e limite se altera de zero para um, indicando a ocorrência de um transitório na rede. Com isso, foi observado um padrão para cada evento transitório possibilitando a classificação do transitório.

3.2 Metodologia proposta

Como em Deliberalli (2014), a proposta apresentada nesse Trabalho é dividida em duas etapas, sendo a primeira encarregada da detecção dos transitórios, a qual recebe os dados e calcula os as distâncias euclidianas entre pontos consecutivos dos respectivos planos formados pelos pares ordenados compostos

pele valor de função diferença atrelado ao valor correspondente no respectivo sinal ao qual função-diferença está associada. Além disso, nessa etapa são calculados os patamares (valores limítrofes para a detecção de um transitório) e verificado se algum destes limites foram ultrapassados, alterando o estado do respectivo detector de zero para um. Caso pelo menos um dos detectores tenha seu estado alterado, o algoritmo verifica quais patamares são ultrapassados em um ciclo e passa para a segunda etapa, que é trata da classificação dos transitórios, a qual é feita a partir da observação de quais patamares foram ultrapassados, considerando que, para um dado tipo de transitório, os patamares excedidos são característicos daquele tipo de transitório. Na Figura 18, é apresentado o fluxograma da metodologia proposta.

Figura 18 – Fluxograma da metodologia proposta.



3.2.1 Detecção de transitórios

A metodologia para detecção dos eventos transitórios foi implementada no *software* MATLAB®. Para a detecção dos transitórios, primeiramente, foram estabelecidos seis planos, havendo um para cada sinal analisado (tensões das três fases e correntes das três fases). Cada plano é formado pela disposição dos pontos formados pelos pares ordenados dados pelas amostras do sinal de corrente ou tensão e suas respectivas funções-diferença. Para cada sinal analisado, a função-diferença é dada pela Equação 5.

$$dif(a) = S(a) - S(a - 1) \quad (5)$$

Onde S representa uma amostra de um sinal de corrente ou tensão, a representa a amostra atual e $a-1$, a amostra anterior. A partir daí, são calculadas as distâncias euclidianas entre dois pontos consecutivos em cada plano, conforme a Equação 6. O resultado desta Equação é comparado à patamares estabelecidos e caso algum patamar seja ultrapassado é efetuado a detecção do transitório e o algoritmo passa para a etapa de classificação do mesmo.

$$dist(a) = \sqrt{(dif(a) - dif(a - 1))^2 + (dif(a))^2} \quad (6)$$

3.2.2 Patamares estabelecidos

Os patamares estabelecidos foram escolhidos de modo a aumentar a precisão do método e simplificar a lógica de classificação. Diferente do método proposto em Deliberalli (2014) foi estabelecido três patamares ao invés de dois, sendo eles três patamares para corrente, onde o patamar de nível 1 é representado pela Equação 7, o de nível 2 pela Equação 8 e o de nível 3 pela Equação 9. Para os planos de tensão também foram estabelecidos três patamares, onde o patamar de nível 1 é representado pela Equação 10, o de nível 2 pela Equação 11 e o de nível 3 pela Equação 12.

$$PI_1 = \mu(jan_i(a)) + 1,3 * \sigma(jan_i(a)) \quad (7)$$

$$PI_2 = \mu(jan_i(a)) + 1,8 * \sigma(jan_i(a)) \quad (8)$$

$$PI_3 = \mu(jan_i(a)) + 2,6 * \sigma(jan_i(a)) \quad (9)$$

$$PV_1 = \mu(jan_v(a)) + 1,3 * \sigma(jan_v(a)) \quad (10)$$

$$PV_2 = \mu(jan_v(a)) + 1,8 * \sigma(jan_v(a)) \quad (11)$$

$$PV_3 = \mu(jan_v(a)) + 2,6 * \sigma(jan_v(a)) \quad (12)$$

Nas equações acima μ e σ representam, respectivamente, a média e o desvio padrão para o conjunto dentro da janela de dados (jan_i, jan_v) correspondente, a qual é composta por 32 amostras do sinal analisado. Percebe-se que a única diferença entre os patamares é o valor que multiplica o desvio padrão, o qual foi escolhido através da simulação de diversos transitórios diferentes. Ressalta-se que os cálculos para definição de cada patamar são independentes para todos sinais de corrente e tensão.

3.2.3 Classificação de transitórios

A classificação dos eventos transitórios é feita com base no conjunto de violações dos patamares em todos os planos considerados após a detecção da falta. Sempre que um patamar é ultrapassado, é atribuído valor lógico alto. Foi estabelecido uma *flag* para cada corrente, a qual irá possuir valor lógico alto quando a corrente for próxima a zero.

Através da simulação de todos os casos do banco de dados, foi desenvolvida uma lógica de decisão para cada tipo de evento transitório. Sendo assim, após a detecção é recolhido o conjunto de patamares ultrapassados por um ciclo e este é comparado com as lógicas de decisão atribuídas aos diferentes tipos de falta.

Além disso, a técnica proposta pode utilizar dados medidos a partir de um barramento ou com os dados de dois barramentos. Sendo que a única diferença entre esses dois métodos será que o método com medição nos dois terminais poderá registrar algum patamar ultrapassado a mais que o outro método por estar medindo os sinais mais próximo do evento, assim facilitando na classificação.

3.2.4 Lógicas para classificação dos transitórios

A criação do algoritmo responsável pela classificação dos transitórios teve por base a característica específica apresentada por cada tipo de transitório em relação à violação dos patamares para as distâncias euclidianas em cada um dos planos considerados. As subseções seguintes descrevem as lógicas para classificação de cada transitório.

3.2.4.1 Lógica para classificação de curtos-circuitos

Através da simulação de todos os casos de curtos-circuitos do banco de dados foi implementada uma lógica de decisão. Na Tabela 1, está representado a lógica de decisão para os curtos-circuitos de cada tipo. Valores unitários nessa Tabela indicam que aquele patamar será sempre ultrapassado para o determinado tipo de transitório. Do contrário, valores nulos indicam o oposto disto. Ainda, posições em branco na tabela representam que alguns casos ultrapassaram o patamar equivalente, mas não todos, isso é explicado pelos fatores que foram variados para a criação do banco de dados.

Tabela 1 – Padrão de patamares para corrente em curtos-circuitos.

Fase	A			B			C		
	PI_1	PI_2	PI_3	PI_1	PI_2	PI_3	PI_1	PI_2	PI_3
Ag	1			0	0	0	0	0	0
Bg	0	0	0	1			0	0	0
Cg	0	0	0	0	0	0	1		
AB	1			1			0	0	0
AC	1			0	0	0	1		
BC	0	0	0	1			1		
ABC/ABC-g	1			1			1		

Fonte: Elaborado pelo autor.

Importante salientar que a principal característica dos curtos-circuitos é ultrapassar o primeiro patamar de corrente da fase em falta e sempre um patamar de tensão de qualquer fase. Toda vez que um desses padrões é verificado, fica caracterizada uma falta do tipo associado ao respectivo padrão apresentado.

3.2.4.2 Lógica para classificação de aberturas de fases

Para os casos de abertura de fases foi utilizado o *flag* que verifica quando a corrente da fase for próxima de zero, com isso caso um ou mais *flags* sejam violados junto com qualquer patamar de tensão violado é feita a classificação da abertura de fase de acordo com os *flags* de fases violadas.

3.2.4.3 Lógica para classificação de entradas de carga

Para as entradas de carga, primeiramente todos os casos simulados foram processados para determinação da lógica de decisão. Na Tabela 2, está representada a lógica da mesma maneira que o apresentado para os curtos-circuitos. Ressalta-se que, da mesma forma que os curtos, as entradas de carga

terão o primeiro patamar da fase em envolvida ultrapassado, mas, diferentemente do verificado para curtos-circuitos, estes nunca irão ultrapassar o segundo patamar de corrente e nenhum patamar de tensão conforme mostrado na Tabela 3.

Tabela 2 – Padrão de patamares para corrente em entradas de carga.

Fase	A			B			C		
Patamares	PI_1	PI_2	PI_3	PI_1	PI_2	PI_3	PI_1	PI_2	PI_3
A	1	0	0	0	0	0	0	0	0
B	0	0	0	1	0	0	0	0	0
C	0	0	0	0	0	0	1	0	0
AB	1	0	0	1	0	0	0	0	0
AC	1	0	0	0	0	0	1	0	0
BC	0	0	0	1	0	0	1	0	0
ABC	1	0	0	1	0	0	1	0	0

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 3 – Padrão de patamares para tensão em entradas de carga.

Fase	A			B			C		
Patamares	PV_1	PV_2	PV_3	PV_1	PV_2	PV_3	PV_1	PV_2	PV_3
A	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AB	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AC	0	0	0	0	0	0	0	0	0
BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ABC	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fonte: Elaborado pelo autor.

De forma análoga ao ocorrido para os curtos-circuitos, toda vez que um padrão apresentado na tabela 2 for verificado, a respectiva entrada de carga fica caracterizada e então o transitório é classificado com a respectiva denominação.

3.2.4.4 Lógica para classificação de energização de transformadores

Da mesma forma que para os outros tipos de transitórios, o processamento de todos os casos simulados para energização de transformadores, tanto a vazio, quanto sob carga, permitiu a elaboração das lógicas de decisão para a classificação desse tipo de evento, a quais são mostradas nas Tabelas 4 e 5.

Tabela 4 – Padrão de patamares para corrente em energizações do transformador.

Fase	A			B			C		
Patamares	PI_1	PI_2	PI_3	PI_1	PI_2	PI_3	PI_1	PI_2	PI_3
ABC	1	1		1	1		1	1	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 5 – Padrão de patamares para tensão em energizações do transformador.

Fase	A			B			C		
Patamares	PV_1	PV_2	PV_3	PV_1	PV_2	PV_3	PV_1	PV_2	PV_3
ABC		0	0		0	0		0	0

Fonte: Elaborado pelo autor.

Novamente, toda a vez que ambos os padrões apresentados nas Tabelas 4 e 5 forem identificados, o evento é classificado como sendo energização de transformador.

3.3 Considerações Finais

Neste Capítulo foi apresentado a metodologia proposta para a detecção e classificação de eventos transitórios.

No Capítulo seguinte, será abordado os resultados obtidos para diferentes tipos de eventos transitórios e uma comparação com outros métodos.

4 ANÁLISE E RESULTADOS

4.1 Considerações Gerais

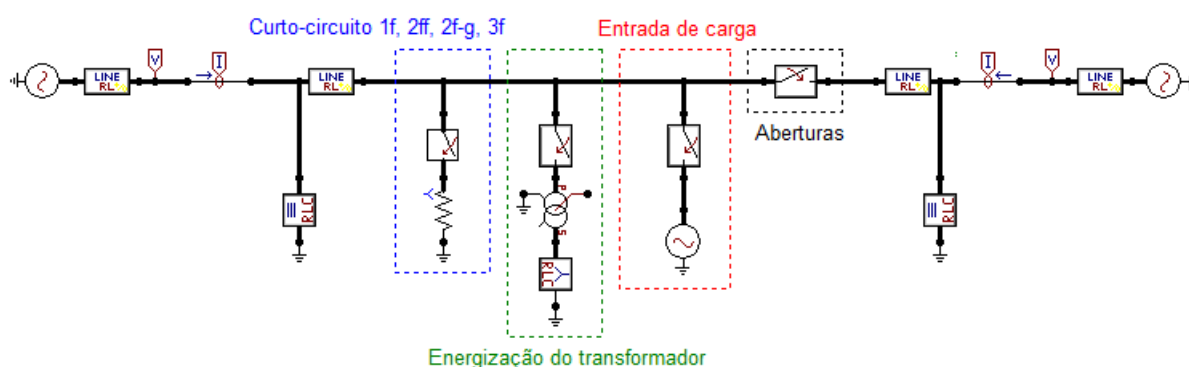
Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos para os testes envolvendo a metodologia descrita neste trabalho. Um sistema teste foi implementado no *software* EMPT – ATP®, a partir do qual diversos casos de eventos transitórios foram simulados para a obtenção de sinais de corrente e tensão, que, por sua vez, formaram o banco de sinais processado pela técnica proposta. Foram gerados um total de 3000 casos para curtos-circuitos. Além disso, foram gerados 381 casos que não caracterizam curto-circuito, que incluem abertura de linhas, variações de cargas e energizações de transformadores. Portanto, gerou-se um total de 3381 casos de transitórios.

Para a avaliação do método proposto foi implementado um algoritmo utilizando o *software* MATLAB®, os quais processaram os sinais do banco para obtenção dos resultados.

4.2 Sistema teste

A viabilidade da metodologia foi testada em um sistema de energia de 230 kV, 60 Hz, com dois geradores conectados por uma linha de transmissão de 100km de distância, com medição de corrente e tensão nos terminais de cada gerador. Todos os estudos de simulações foram realizados usando o *software* EMPT – ATP®. Uma frequência de amostragem de 1 MHz foi usada nos estudos de simulação gerando uma simulação de 1 s com os transitórios ocorridos em, aproximadamente, em 0,2 s. O diagrama do esquemático do sistema é mostrado na Figura 8 e os parâmetros do sistema e da linha são dados na Tabela 6.

Figura 19 – Sistema teste.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 6 – Parâmetros do sistema utilizado para simulações.

Parâmetros do sistema	
Z_{SO}	$3,681 + j24,515\Omega$
Z_{S1}	$0,818 + j7,575\Omega$
Z_{LT0}	$0,1942 + j1,2249 \Omega/\text{km}$
Z_{LT1}	$0,042 + j0,3877 \Omega/\text{km}$

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.1 Curtos-circuitos

Os estudos das simulações de curtos-circuitos foram realizados com uma ampla variação de ângulo de carga, ângulo de incidência do transitório, resistência de falta e distância de falta. Os valores que foram escolhidos para este estudo são os seguintes:

- Ângulos de carga de -30° , -1° , 0° , 1° , e 30° ;
- Ângulos de incidência do transitório de 0° , 40° e 90° ;
- Resistência de falta de $0,1\Omega$, 10Ω , 20Ω e 50Ω ;
- Distância de falta de 0 km, 20 km, 50 km, 80 km e 100 km.

Para todos os dez tipos de curtos-circuitos (Ag, Bg, Cg, AB, AC, BC, AB-g, AC-g, BC-g e ABC/ABC-g) foram consideradas as variações citadas anteriormente, gerando 3000 casos.

4.2.2 Aberturas de linhas

Para a simulação de aberturas de linhas foi considerado a distância fixa de 100 km e variado os seguintes parâmetros:

- Ângulos de carga de -30° , -1° , 0° , 1° , e 30° ;
- Ângulos de incidência do transitório de 0° , 40° e 90° .

Foram realizadas simulações para todos conjuntos de fases (A, B, C, AB, AC, BC e ABC), gerando 84 casos.

4.2.3 Entrada de carga

Para as simulações de entradas de carga, foi considerada a distância fixa de 100 km e variado os seguintes parâmetros:

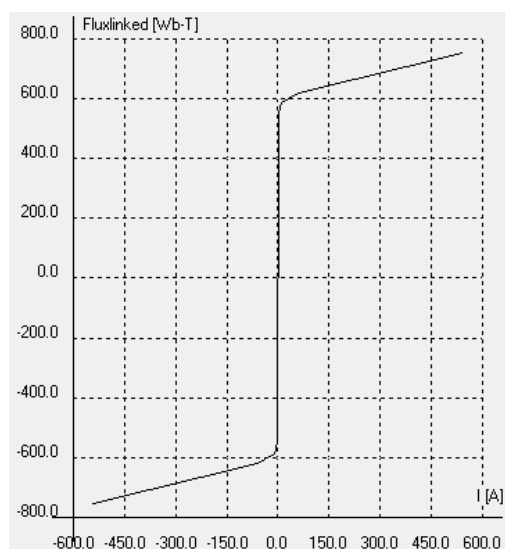
- Ângulos de carga de 1° e 30° ;
- Variação de carga de 2,5%, 5%, 7,5% e 10%;
- Ângulos de incidência do transitório de 0° , 40° e 90° .

Foram realizadas simulações para todos os conjuntos de fases (A, B, C, AB, AC, BC e ABC), gerando 147 casos.

4.2.4 Energizações de transformadores

Para as energizações de transformadores, foi utilizado um modelo do transformador saturável mostrado por RIBEIRO (2017), cuja curva de saturação é mostrada na Figura 20. Foram variados os mesmos parâmetros que o estudo de curtos-circuitos, considerando o transformador a vazio e sob carga, gerando 150 casos.

Figura 20 – Curva de saturação do transformador estudado.



Fonte: Elaborado pelo autor.

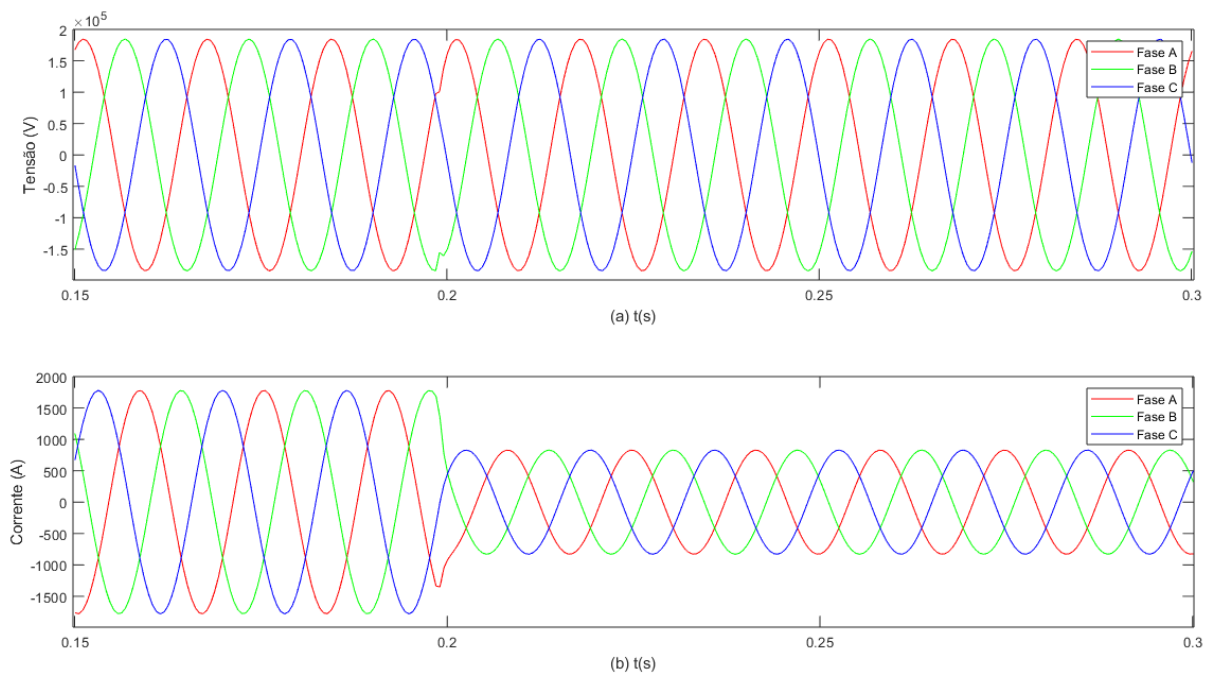
4.3 Resultados

Nessa Seção, são apresentados alguns resultados obtidos a partir do processamento dos sinais do banco para a atuação da metodologia proposta. Além disso, a análise do desempenho da metodologia, tanto da aplicação com dados de um terminal, quanto com dados dos dois terminais, bem como uma comparação com resultados apresentados por outras metodologias propostas recentemente, são apresentadas nas Subseções seguintes.

4.3.1 Caso 1 – Curto-circuito trifásico

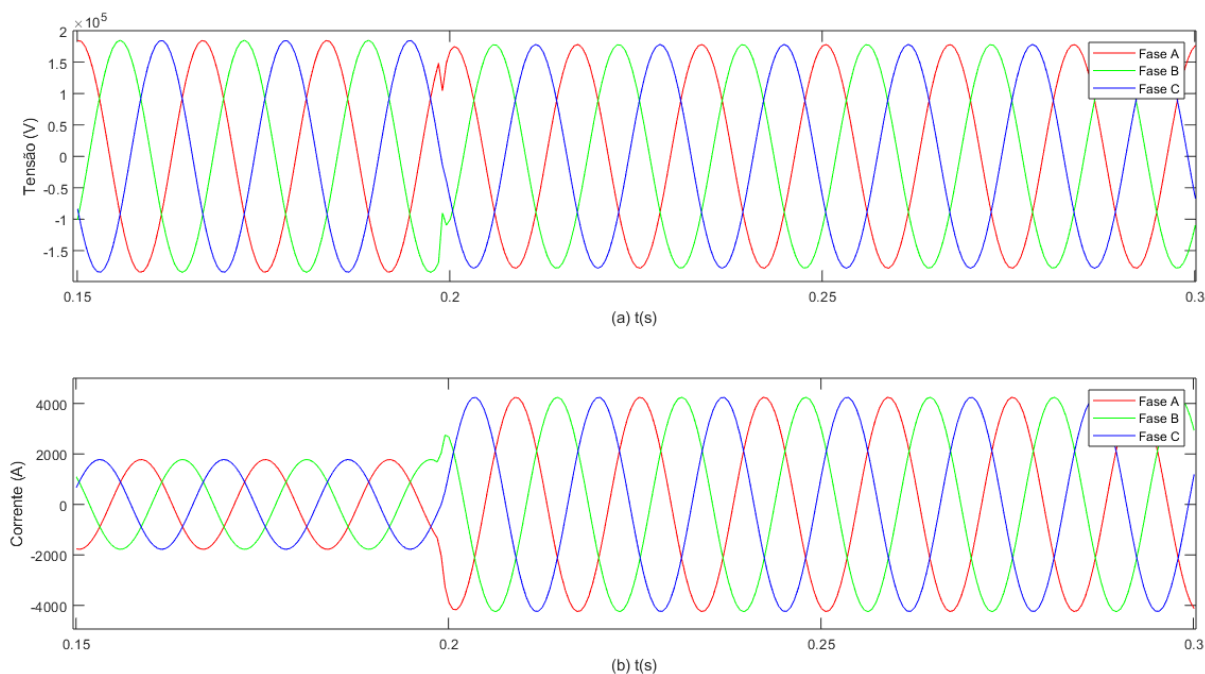
Nas Figuras 21 e 22 estão representados os sinais de tensão e corrente para um caso de curto-circuito trifásico no primeiro e segundo terminais respectivamente. O curto-circuito mostrado foi simulado com ângulo de carga de -30° , ângulo de incidência 40° , resistência de falta de 50Ω e distancia da falta do primeiro terminal de 100 Km no tempo 0,19888 s.

Figura 21 – Formas de onda para CC3Ø (ABC) no primeiro terminal. (a) Ondas de tensão. (b) Ondas de corrente.



Fonte: Elaborado pelo autor.

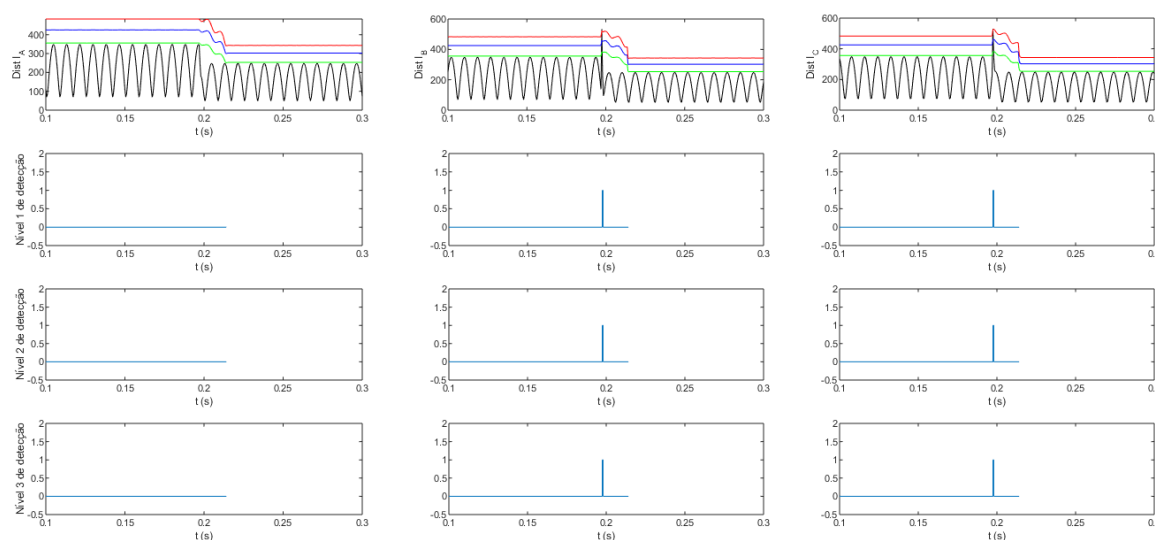
Figura 22 – Formas de onda para CC3Ø (ABC) no segundo terminal. (a) Ondas de tensão. (b) Ondas de corrente.



Fonte: Elaborado pelo autor.

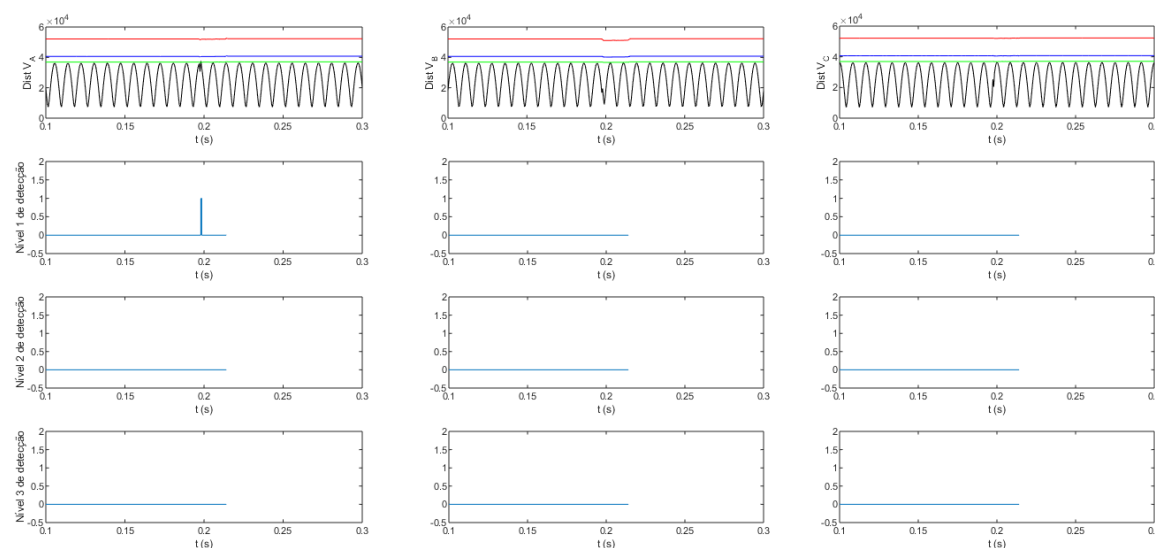
Nas Figuras 23 e 24 está representado a resposta do cálculo da distância euclidiana e dos respectivos patamares ultrapassados para os sinais de corrente e tensão do primeiro terminal. Nas Figuras 25 e 26 o mesmo que anteriormente para os sinais do segundo terminal.

Figura 23 – Variação das distâncias euclidianas para os sinais de corrente e estado dos detectores para CC3Ø no primeiro terminal.



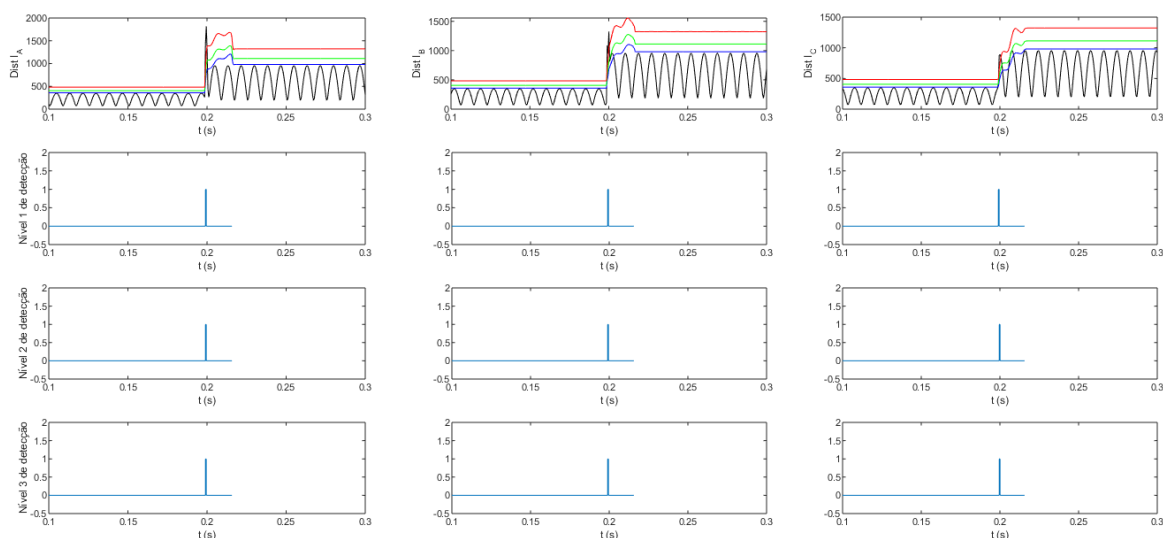
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 24 – Variação das distâncias euclidianas para os sinais de tensão e estado dos detectores para CC3Ø no primeiro terminal.



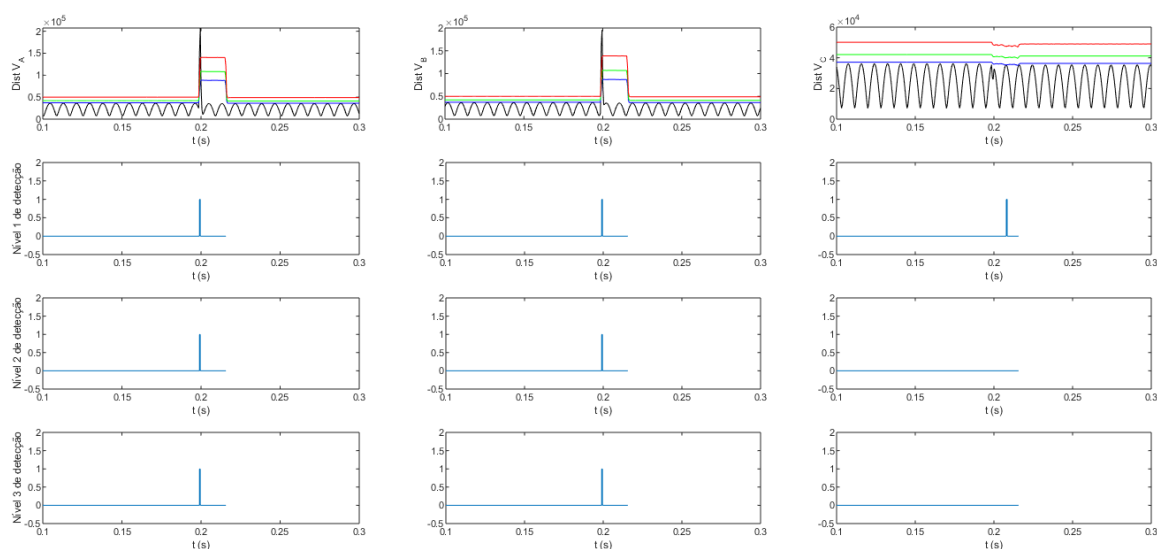
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 25 – Variação das distâncias euclidianas para os sinais de corrente e estado dos detectores para CC3Ø no segundo terminal.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 26 – Variação das distâncias euclidianas para os sinais de tensão e estado dos detectores para CC3Ø no segundo terminal.



Fonte: Elaborado pelo autor.

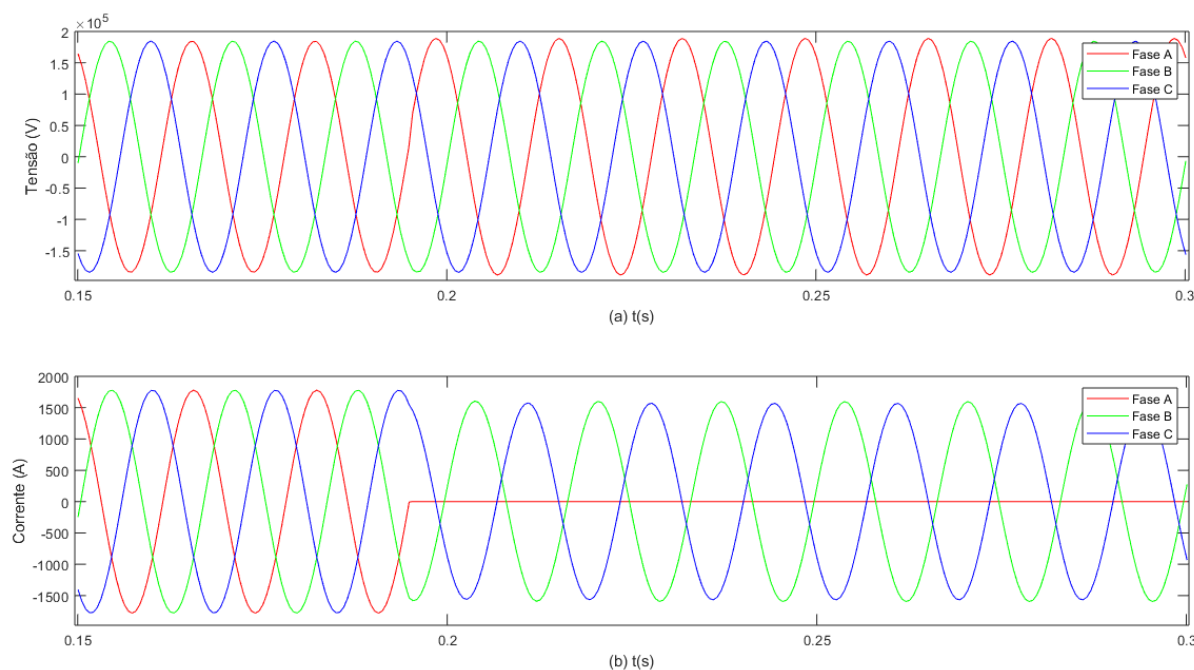
Para as duas metodologias a detecção foi no tempo de 0,19902s e a classificação foi no tempo de 0.21569s, mas a metodologia que utiliza apenas os dados do primeiro terminal classificou como curto-circuito bifásico entre as fases B e

C, pois como é mostrado na Figura 23 os patamares de corrente da fase C não foram ultrapassados resultando assim em um erro. A metodologia que utiliza os dados dos dois terminais diferente da primeira conseguiu classificar o evento como curto-circuito trifásico, pois como é mostrado na Figura 25 os patamares de corrente da fase C são ultrapassados e com isso a lógica de classificação funcionou corretamente.

4.3.2 Caso 2 – Abertura monopolar

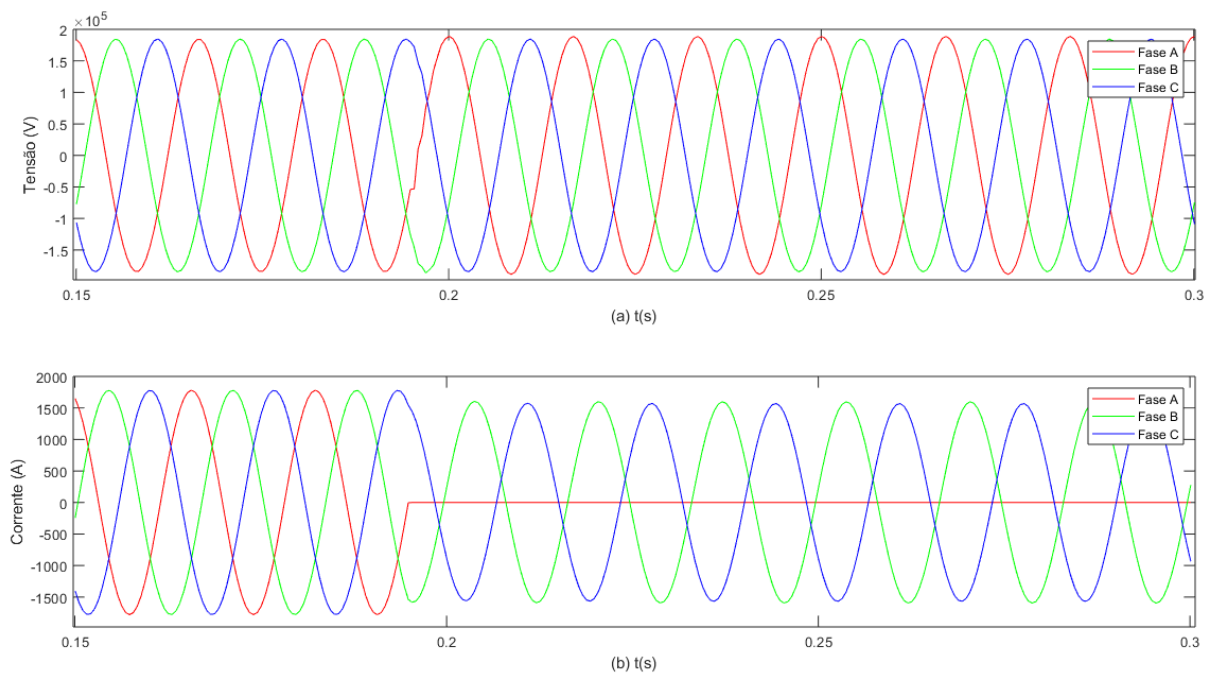
Nas Figuras 27 e 28 estão representados os sinais de tensão e corrente para uma abertura monopolar na fase A no primeiro e segundo terminais respectivamente. A abertura monopolar foi simulada com ângulo de carga de 30° , ângulo de incidência 0° e distancia da falta do primeiro terminal de 100 Km no tempo 0,19464 s.

Figura 27 – Formas de onda para abertura monopolar no primeiro terminal. (a) Ondas de tensão. (b) Ondas de corrente.



Fonte: Elaborado pelo autor.

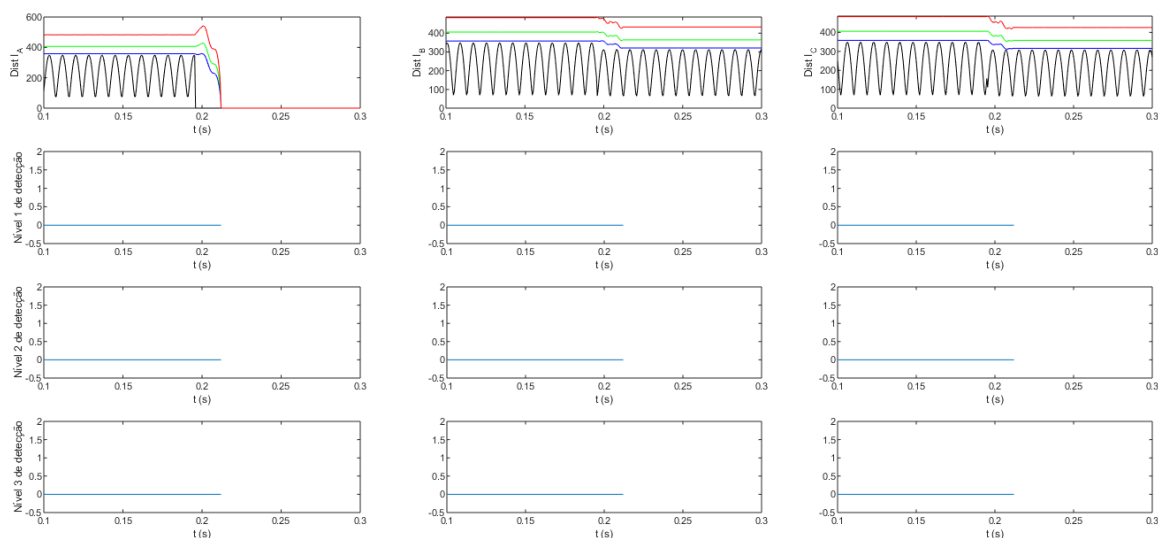
Figura 28 – Formas de onda para abertura monopolar no segundo terminal. (a) Ondas de tensão. (b) Ondas de corrente.



Fonte: Elaborado pelo autor.

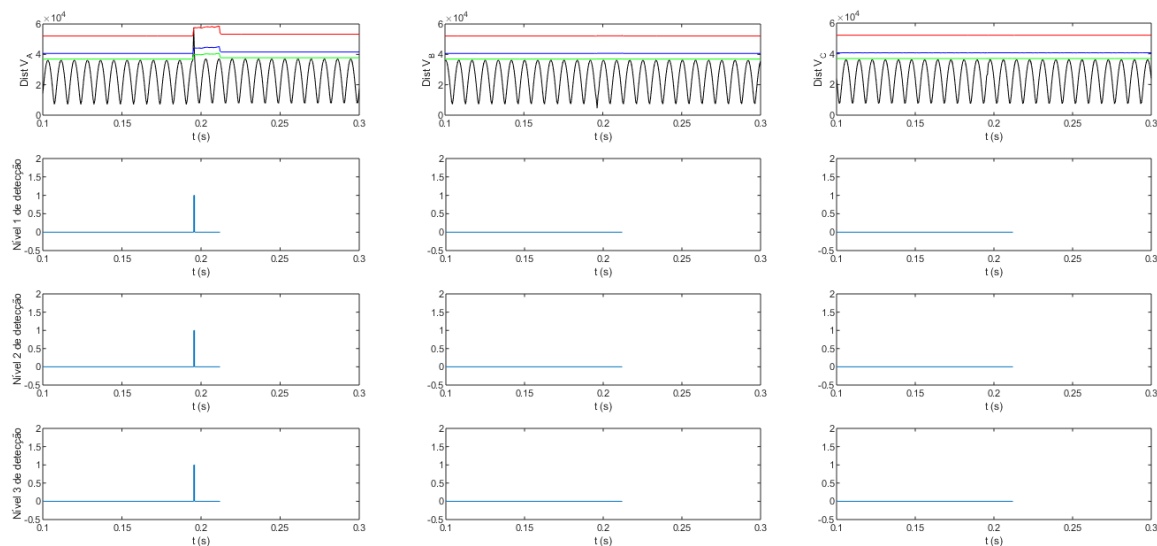
Nas Figuras 29 e 30 está representado a resposta do cálculo da distância euclidiana e dos respectivos patamares ultrapassados para os sinais de corrente e tensão do primeiro terminal. Nas Figuras 31 e 32 o mesmo que anteriormente para os sinais do segundo terminal.

Figura 29 – Variação das distâncias euclidianas para os sinais de corrente e estado dos detectores para abertura monopolar no primeiro terminal.



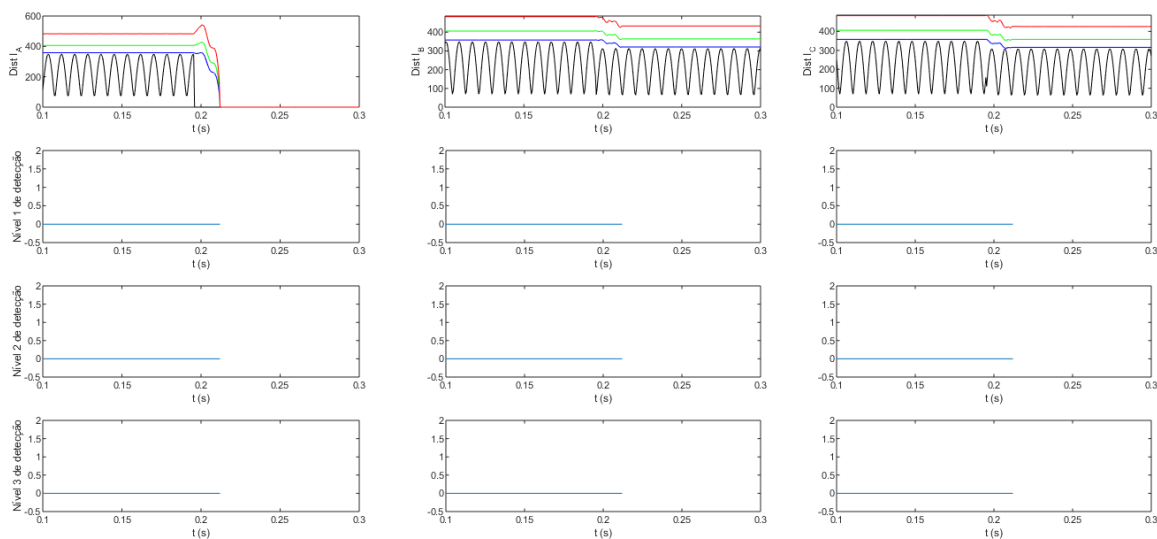
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 30 – Variação das distâncias euclidianas para os sinais de tensão e estado dos detectores para abertura monopolar no primeiro terminal.



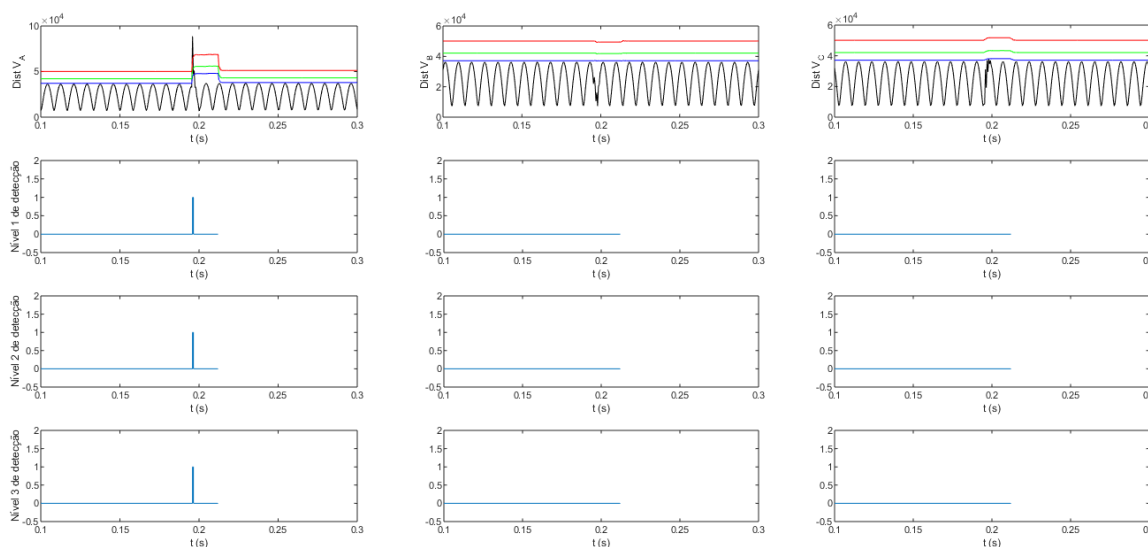
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 31 – Variação das distâncias euclidianas para os sinais de corrente e estado dos detectores para abertura monopolar no segundo terminal.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 32 – Variação das distâncias euclidianas para os sinais de tensão e estado dos detectores para abertura monopolar no segundo terminal.



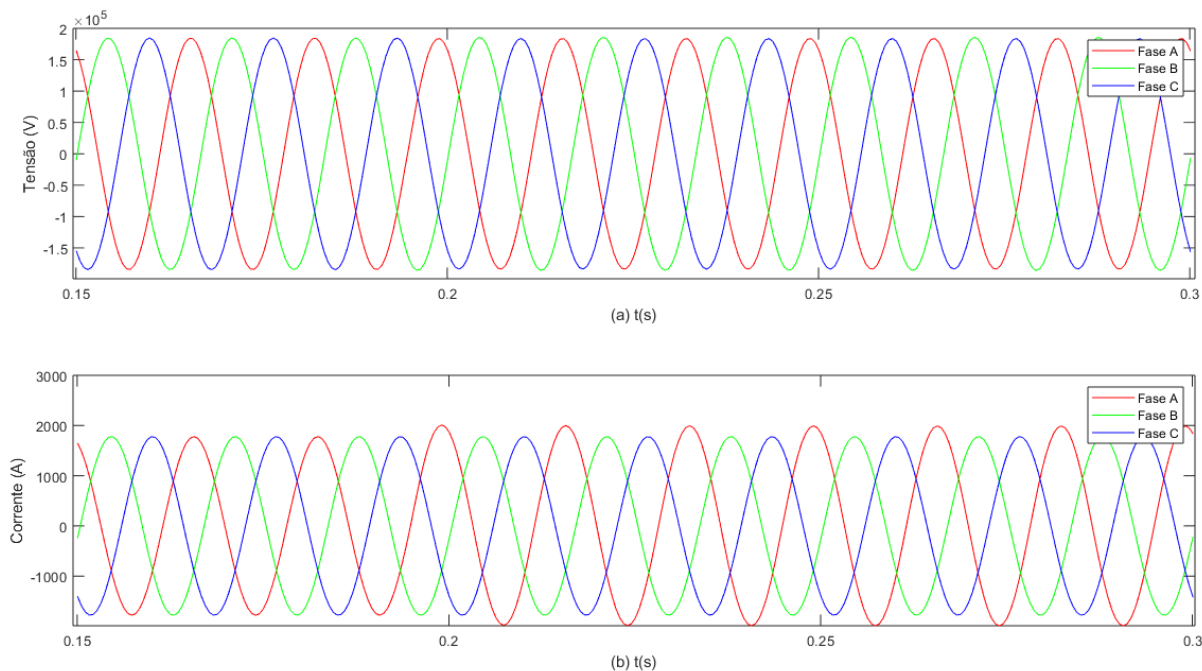
Fonte: Elaborado pelo autor.

Para as duas metodologias a detecção foi no tempo de 0,19537s e a classificação foi no tempo de 0.21205s, ambas metodologias apresentaram a classificação correta.

4.3.3 Caso 3 – Entrada de carga monofásica

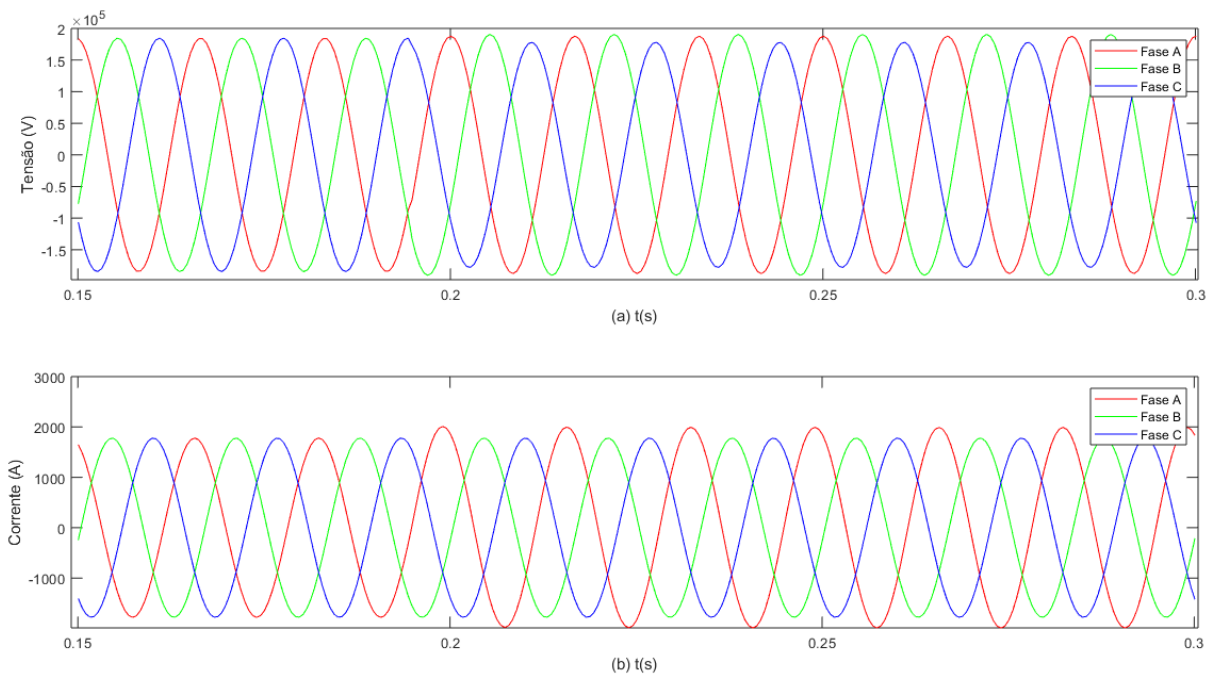
Nas Figuras 33 e 34, estão representadas as respostas das distâncias euclidianas e dos estados dos detectores associados a cada patamar para uma entrada de carga na fase A. A entrada de carga mostrada foi simulada com ângulo de carga de 30°, ângulo de incidência 0°, variação de carga de 5% e distancia da falta do primeiro terminal de 100 Km no tempo 0,19464 s.

Figura 33 – Formas de onda para entrada de carga na fase A no primeiro terminal. (a) Ondas de tensão. (b) Ondas de corrente.



Fonte: Elaborado pelo autor.

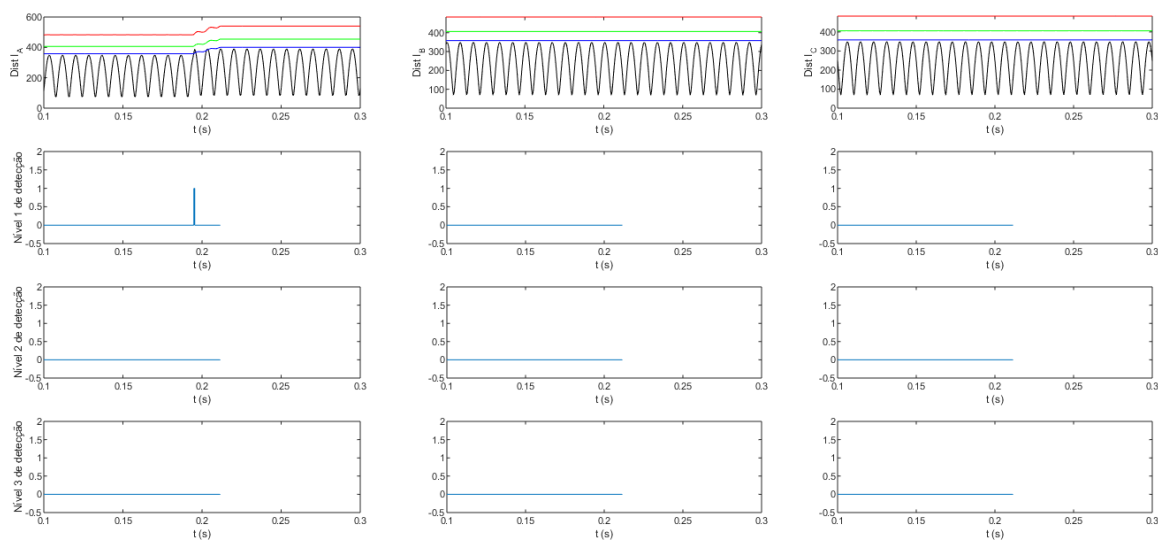
Figura 34 – Formas de onda para entrada de carga na fase A no segundo terminal. (a) Ondas de tensão. (b) Ondas de corrente.



Fonte: Elaborado pelo autor.

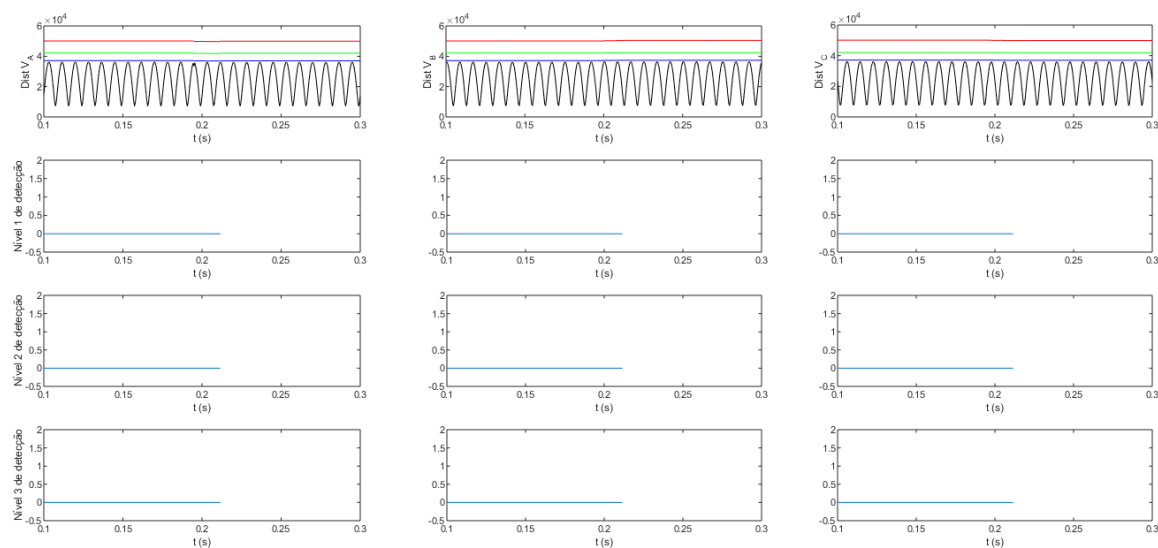
Nas Figuras 35 e 36 está representado a resposta do cálculo da distância euclidiana e dos respectivos patamares ultrapassados para os sinais de corrente e tensão do primeiro terminal. Nas Figuras 37 e 38 o mesmo que anteriormente para os sinais do segundo terminal.

Figura 35 – Variação das distâncias euclidianas para os sinais de corrente e estado dos detectores para entrada de carga na fase A no primeiro terminal.



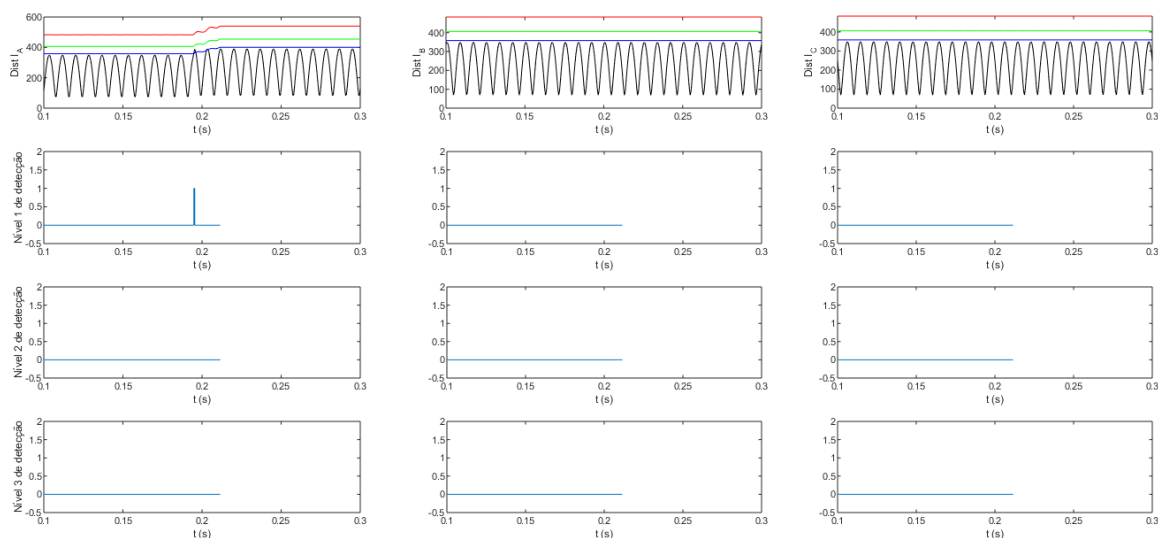
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 36 – Variação das distâncias euclidianas para os sinais de tensão e estado dos detectores para entrada de carga na fase A no primeiro terminal.



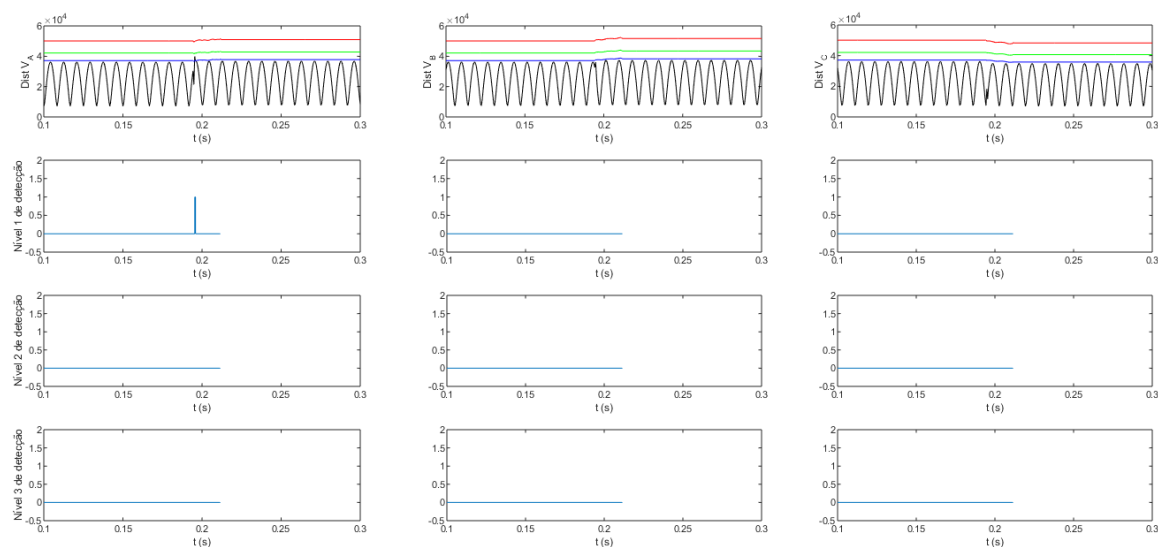
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 37 – Variação das distâncias euclidianas para os sinais de corrente e estado dos detectores para entrada de carga na fase A no segundo terminal.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 38 – Variação das distâncias euclidianas para os sinais de tensão e estado dos detectores para entrada de carga na fase A no segundo terminal.



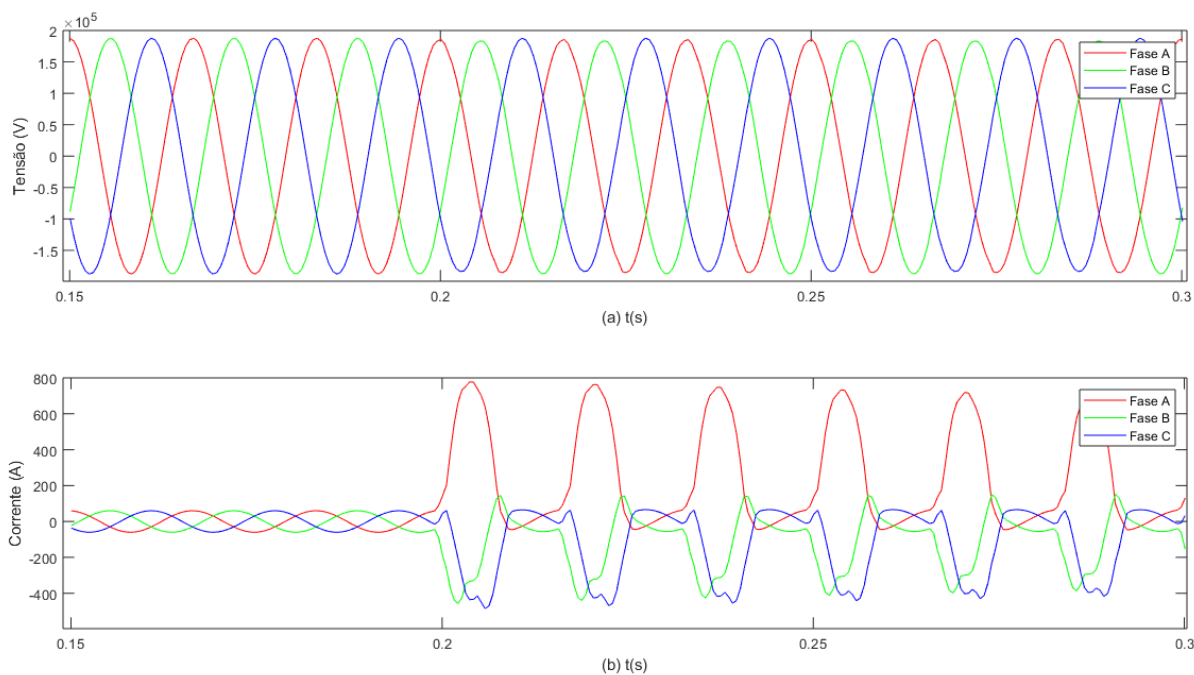
Fonte: Elaborado pelo autor.

Para as duas metodologias a detecção foi no tempo de 0,19485s e a classificação foi no tempo de 0,21513s, ambas metodologias apresentaram a classificação correta.

4.3.4 Caso 4 – Energização de transformador

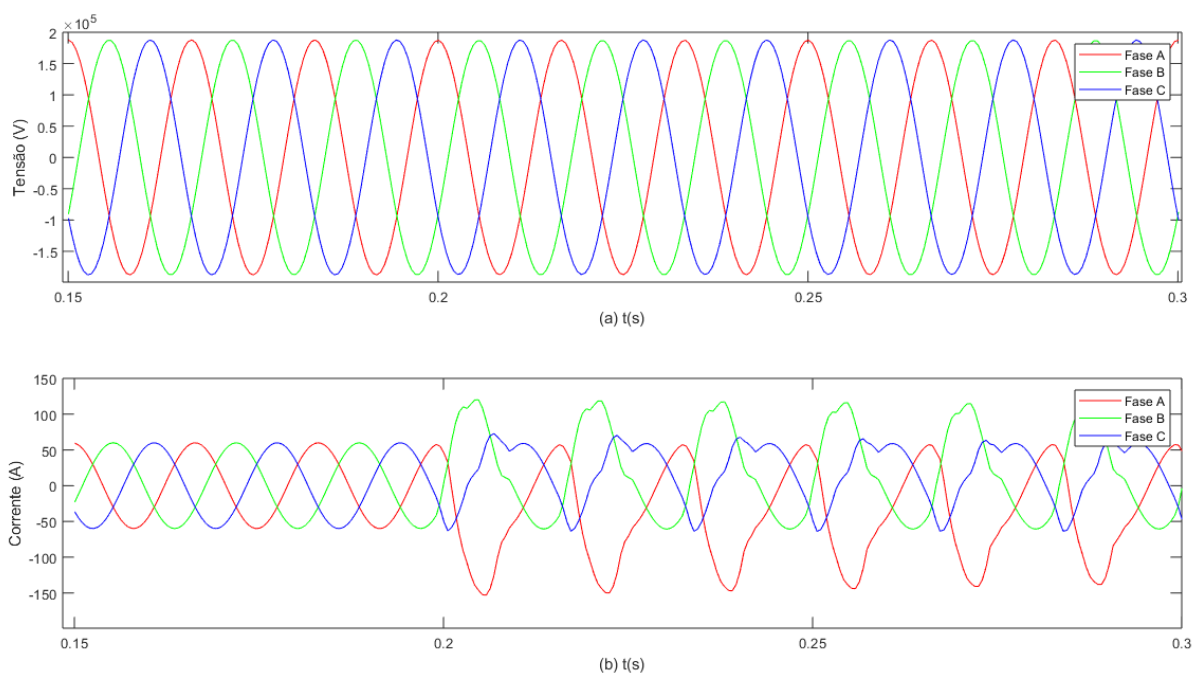
Nas Figuras 39 e 40, estão representadas as respostas das distâncias euclidianas e dos estados dos detectores associados a cada patamar para uma energização do transformador.

Figura 39 – Formas de onda para energização do transformador no primeiro terminal. (a) Ondas de tensão. (b) Ondas de corrente.



Fonte: Elaborado pelo autor.

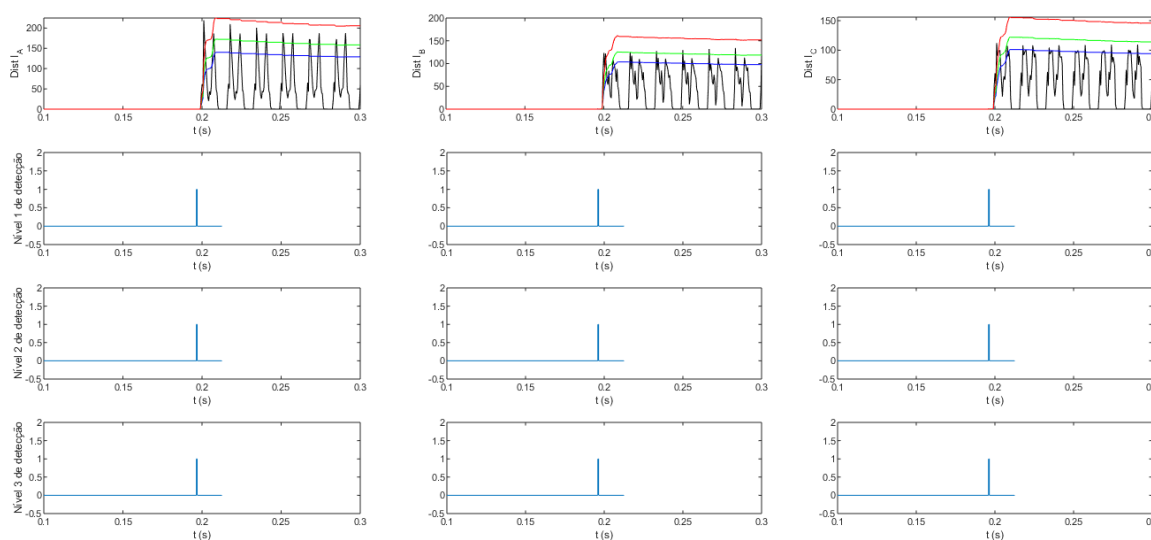
Figura 40 – Formas de onda para energização do transformador no segundo terminal. (a) Ondas de tensão. (b) Ondas de corrente.



Fonte: Elaborado pelo autor.

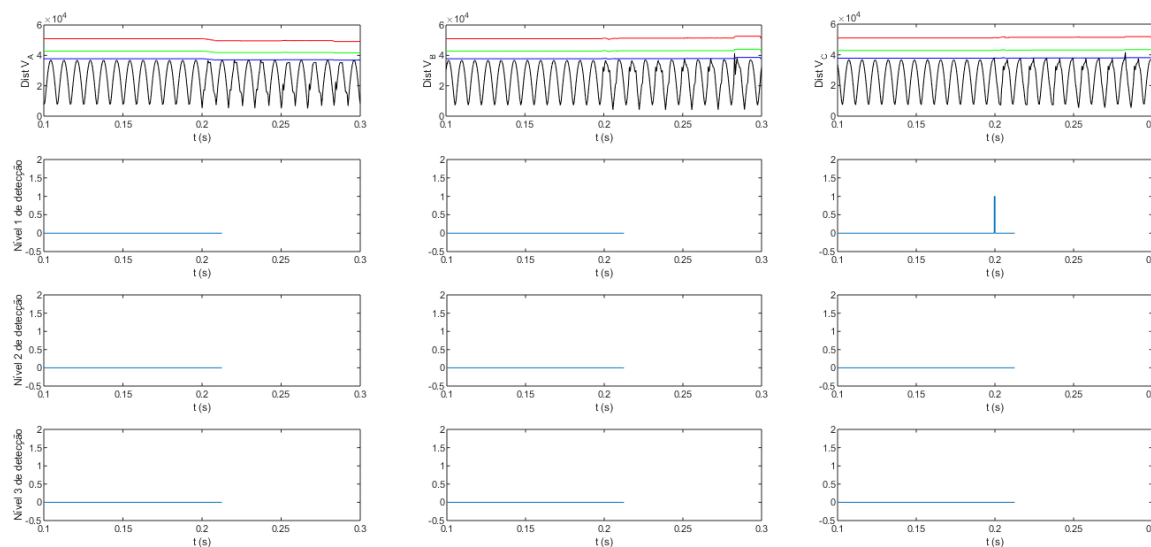
Nas Figuras 41 e 42 está representado a resposta do cálculo da distância euclidiana e dos respectivos patamares ultrapassados para os sinais de corrente e tensão do primeiro terminal. Nas Figuras 43 e 44 o mesmo que anteriormente para os sinais do segundo terminal.

Figura 41 – Variação das distâncias euclidianas para os sinais de corrente e estado dos detectores para energização do transformador no primeiro terminal.



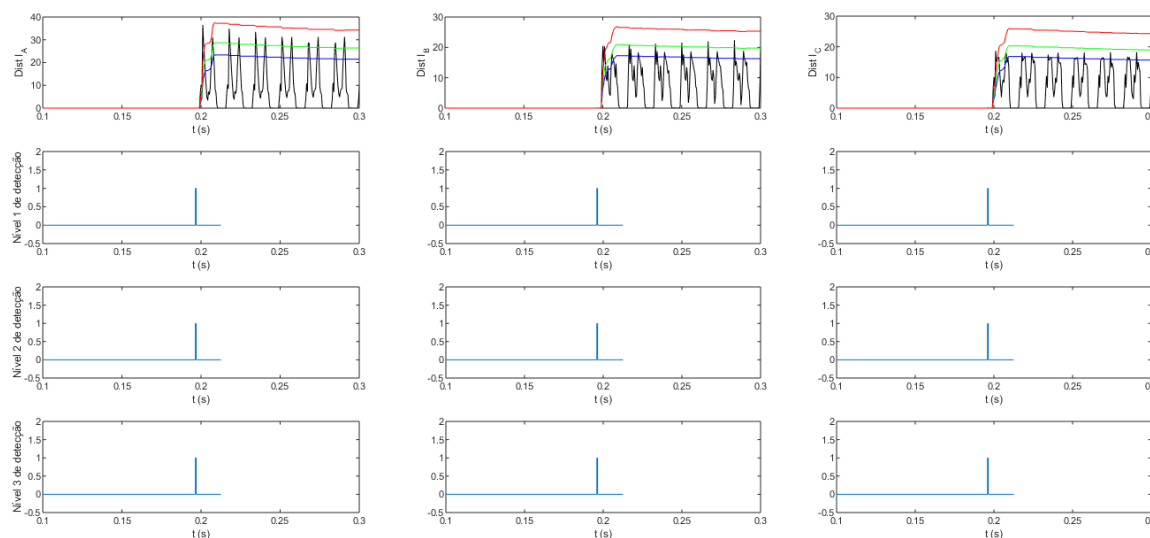
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 42 – Variação das distâncias euclidianas para os sinais de tensão e estado dos detectores para energização do transformador no primeiro terminal.



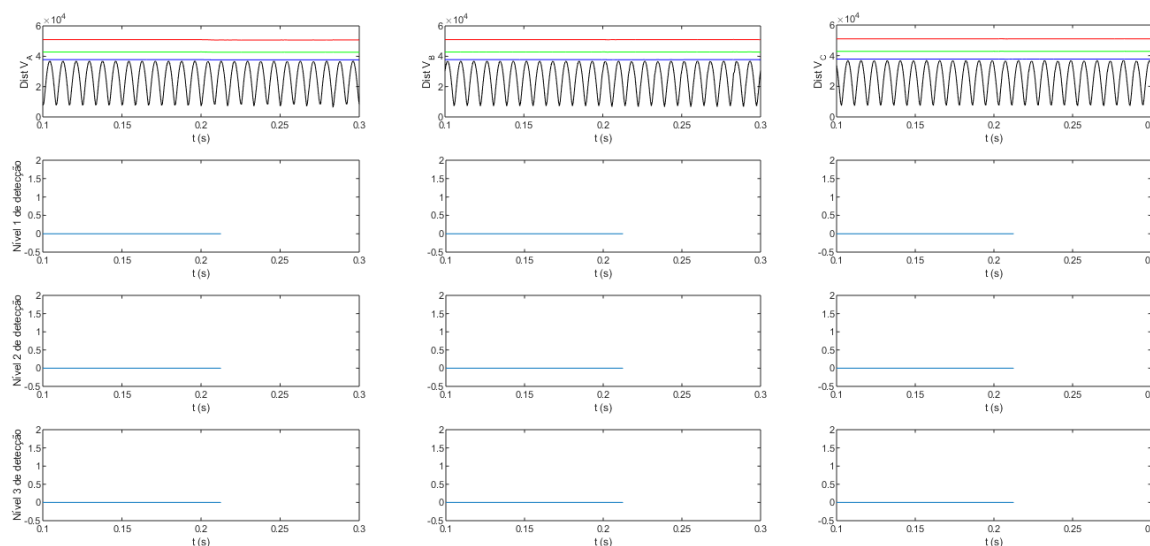
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 43 – Variação das distâncias euclidianas para os sinais de corrente e estado dos detectores para energização do transformador no segundo terminal.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 44 – Variação das distâncias euclidianas para os sinais de tensão e estado dos detectores para energização do transformador no segundo terminal.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para as duas metodologias a detecção foi no tempo de 0,19954s e a classificação foi no tempo de 0.21621s. A energização mostrada foi simulada com ângulo de carga de 1° , ângulo de incidência 0° e distancia da falta do primeiro terminal de 0 Km no tempo 0,19580 s.

4.2.5 Resultados da classificação com medição em um terminal

O primeiro algoritmo implementado tem a função de classificar todos os transitórios com base em dados medidos em apenas um dos terminais do sistema. Os resultados dos testes para classificação de transitórios são mostrados na Tabela 7. A precisão geral para classificação de faltas manteve-se de 99,5%.

Tabela 7 – Performance do algoritmo proposto para diferentes tipos de transitórios.

Tipo de falta	Número de casos	Erros de classificação	Acertos de classificação	Precisão (%)
CC1Ø-g	900	0	900	100
CC2Ø-g	900	0	900	100
CC2Ø	900	3	897	99,66
CC3Ø-g	300	12	288	96
Aberturas	84	0	84	100
Entradas de carga	147	0	147	100
Energizações de transformadores	150	0	150	100
Total	3381	15	3366	99,55

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 8 mostra que a precisão foi afetada pela resistência de falta, a qual se soma à resistência da linha de transmissão, reduzindo a amplitude da contribuição do respectivo terminal para a corrente do curto-circuito, tornando esse evento muito semelhante a uma entrada de carga. Para resolver esse problema foi proposto o segundo algoritmo com medição nos dois terminais.

Tabela 8 – Performance do algoritmo proposto para diferentes tipos de resistência de falta.

Resistência de falta (Ω)	Número de casos	Erros de classificação	Acertos de classificação	Precisão (%)
0,1	750	0	750	100
10	750	1	749	99,86
20	750	4	746	99,46
50	750	10	740	98,66
Total	3000	15	2985	99,55

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.6 Resultados da classificação com medição nos dois terminais

O segundo algoritmo implementado tem a função de classificar todos os transitórios, mas com o diferencial de utilizar a medição em dois terminais, tendo essa aplicação o principal objetivo de classificar corretamente os casos de curto-

circuito com alta resistência de falta. O funcionamento é igual ao primeiro algoritmo, apenas processando os dados nos dois terminais ao invés de um. Os resultados dos testes para classificação de transitórios são mostrados na Tabela 9. A precisão geral para classificação de faltas foi de 100%.

Tabela 9 – Performance do algoritmo proposto para diferentes tipos de transitórios.

Tipo de falta	Número de casos	Erros de classificação	Acertos de classificação	Precisão (%)
CC1Ø-g	900	0	900	100
CC2Ø-g	900	0	900	100
CC2Ø	900	0	900	100
CC3Ø-g	300	0	300	100
Aberturas	84	0	84	100
Entradas de carga	147	0	147	100
Energizações de transformadores	150	0	150	100
Total	3381	0	3381	100

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.4 Comparação com outros métodos

Um resumo da comparação do método proposto com outros métodos existentes é mostrado na Tabela 10. Destaca-se que os dois algoritmos propostos possuem uma melhor precisão entre os métodos comparados e que nenhum dos outros trabalhos realiza a classificação de transitórios diferentes de curtos-circuitos.

Tabela 10 – Comparação com outros métodos.

Método	Número de casos testados	Precisão (% de atuação correta em relação ao total de casos)
Algoritmo proposto com medição em um terminal	3381	99,55
Algoritmo proposto com medição nos dois terminais	3381	100
Parikh et al. (2010)	25200	98,70
Vyas et al. (2016)	54000	99,43
Malathi et al. (2011)	28800	99,11
Eristi (2013)	21036	99,301

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.5 Considerações Finais

Neste Capítulo foram expostos os resultados para simulações para todos os eventos transitórios que foram abordados nesse trabalho. A partir dos resultados das simulações foi possível concluir que a metodologia proposta atendeu as expectativas.

No Capítulo seguinte, será abordado as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

5 Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros

5.1 Conclusões

Este trabalho apresenta uma melhoria para uma proposta para detecção e classificação de eventos transitórios no SEP. Foram simulados diversos eventos transitórios e diversas variações de parâmetros para cada um deles, de modo a provar a robustez e eficácia da proposta.

Neste trabalho foi descrito uma breve revisão bibliográfica com o intuito de validar a metodologia proposta. A partir disso, foi possível a simulação dos eventos transitórios apresentados nesse trabalho, sendo que essas simulações foram obtidas a partir de um sistema elétrico simulado no *software* EMTP-ATP®. Assim, foram apresentadas as diferenças entre esses eventos.

Dessa forma, a lógica computacional foi de suma importância no trabalho, a qual verifica o conjunto de patamares ultrapassados em um ciclo após a detecção e assim efetua a classificação dos eventos transitórios.

Por fim, de forma geral, a proposta mostrou-se apta para aplicações em tempo real, dado que ela utiliza apenas os dados de um ciclo para detectar e classificar vários tipos de eventos transitórios com uma precisão de 100%, maior que outros métodos recentes.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Como sugestões para trabalhos futuros, citam-se:

- Implementar outras técnicas para detecção e classificação, de modo a efetuar uma melhor comparação de desempenho entre trabalho;
- Implementar outros sistemas teste, de modo a abranger mais casos próximos a realidade do SEP.

REFERÊNCIAS BIBLIGRÁFICAS

- BO, Z. Q.; JIANG F.; CHEN Z.; DONG X. Z.; WELLER G.; REDFERN M. A., **Transient based protection for power transmission systems**, *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, 2000.
- CHEN, K.; HUANG, C.; HE, J., **Fault detection, classification and location for transmission lines and distribution systems: a review on the methods**, in *High Voltage*, (2016).
- CZERNORUCKI, M. V., **Representação de transformadores em estudos de transitórios eletromagnéticos**, Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007
- DELIBERALLI, W.J, **Uma nova proposta para detecção e classificação de transitório em linhas de transmissão**, Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal do Pampa, 2014.
- ERISTI, H., **Fault diagnosis system for series compensated transmission line based on wavelet transform and adaptive neuro-fuzzy inference system**, *Measurement*, (2013).
- FILHO, J. M.; MAMEDE, D. R., **Proteção de sistemas elétricos de potência**, 1st ed., Rio de Janeiro: LTC, 2011.
- INÁCIO, Maurílio José, **Detecção e classificação de faltas em linhas de transmissão utilizando transformada Wavelet e rede lógica neurofuzzy com aprendizado participativo**, Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, 2010.
- KIM, S. D.; MORCOS, M. M., **An improved method for classifying power quality disturbances**, *Electric Power Components and Systems*, 32(4), 407–420, 2004.
- MALATHI, V.; MARIMUTHU, N.S.; BASKAR, S.; RAMAR, K., **Application of extreme learning machine for series compensated transmission line protection**, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, (2011).
- PARIKH, U. B.; DAS, B.; MAHESHWARI, R., **Fault classification technique for series compensated transmission line using support vector machine**, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, (2010).
- RIBEIRO, N. S. S., **Modelagem transformadores ATP V1 FB**, 2017
- SILVA, D.T., **Detecção e localização de distúrbios transitórios em linhas de transmissão de energia utilizando sensores sem fio**, Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, 2010.
- SLUIS, L. van der. **Transients in power systems**. 1st. Ed. Arnhem, Netherlands: John Wiley & Sons, 2001.

VYAS, B. Y.; DAS B.; MAHESHWARI R. P., **Improved Fault Classification in Series Compensated Transmission Line: Comparative Evaluation of Chebyshev Neural Network Training Algorithms**, in *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, (2016).