

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

RAFAEL MEISTER FERNANDES

**UMA NOVA TÉCNICA PARA DETECÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE TRANSITÓRIOS
EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA**

**Alegrete
2017**

RAFAEL MEISTER FERNANDES

**UMA NOVA TÉCNICA PARA DETECÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE TRANSITÓRIOS
EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA**

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.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Machado dos Santos.

**Alegrete
2017**

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).

M515a Meister Fernandes, Rafael

UMA NOVA TÉCNICA PARA DETECÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE TRANSITÓRIOS EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA / Rafael Meister Fernandes.

72 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação)-- Universidade Federal do Pampa, ENGENHARIA ELÉTRICA, 2017.

"Orientação: Eduardo Machado dos Santos".

1. Sistemas Elétrico de Potência. 2. Detecção e Classificação de Transitórios. I. Título.

RAFAEL MEISTER FERNANDES

UMA NOVA TÉCNICA PARA DETECÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE TRANSITÓRIOS EM SISTEMAS
ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

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: Sistema Elétrico de Potência

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 4 de dezembro de 2017.

Banca examinadora:



Prof. Dr. Eduardo Machado dos Santos

Orientador



Prof. Me. John Jefferson Antunes Saldanha

UNIPAMPA



Prof. Me. Marcelo Hahn Durgante

UNIPAMPA

Dedico este trabalho aqueles que estiveram do meu lado em toda a minha trajetória acadêmica.

AGRADECIMENTO

Agradeço primeiramente a Deus que me guiar em todos os meus passos, e me ilumina nas horas difíceis.

Aos meus pais Ernandes e Maria Helena por todo o apoio e ajuda que me dão para me trazer alegria. E a minha avó Clementina que não está mais entre-nos, mas que sempre rezou muito por mim para entrar na faculdade.

Em especial a minha namorada Roberta por estar do meu lado e me acompanhar em algumas cadeiras da graduação e me ajudar sempre que preciso.

Agradeço também ao meu amigo e orientador Eduardo Machado dos Santos, para me auxiliar neste trabalho e tua paciência e compressão nas horas de dificuldade, e ao pessoal do grupo GESEP que estava sempre disposto a apoiar e acompanhar nas horas alegres e tristes durante a graduação.

E também aos amigos que fiz ao longo do curso, de maneira simples aqui faço um o agradecimento, a cada um de vocês, obrigados a todos pela amizade e principalmente a parceria nas horas fora na instituição.

“Devemos estar dispostos a nos livrar da vida que planejamos para ter a vida que nos espera”.

Joseph Campbell

RESUMO

Frequentemente, os sistemas elétricos de potência estão expostos a distúrbios transitórios que produzem distorções nos sinais de corrente e tensão da rede, podendo causar a interrupção no fornecimento de energia pela ação dos relés de proteção. Nesse contexto, diversas metodologias para detecção e classificação de transitórios já foram propostas. Entretanto, nenhuma delas apresentou desempenho satisfatório para todas as condições operacionais e transitórias dos sistemas elétricos de potência. Sendo assim, este trabalho propõe o aprimoramento de uma técnica para detecção e classificação de transitórios. Tal técnica é fundamentada no cálculo contínuo das distâncias euclidianas entre pontos consecutivos nos planos formados pelos pares ordenados, cujas coordenadas são dadas pelos valores amostrados dos sinais de tensão e corrente, e suas respectivas funções diferença. A detecção do transitório ocorre sempre que um valor limite aceitável para as condições normais de operação do sistema é excedido em um dos planos, correspondentes aos sinais de corrente e tensão da rede, para pelo menos uma das fases. A partir da detecção do transitório, passa-se a fase de classificação, a qual é feita de acordo com os padrões verificados para cada tipo de transitório em relação ao comportamento das distâncias euclidianas nos já referidos planos. Para tal, fez-se necessária a utilização de três patamares, tanto para os sinais de corrente quanto de tensão, que, quando ultrapassados de acordo com o padrão verificado para cada forma de onda, caracterizam determinado transitório. A classificação é estabelecida quando os padrões detectados não se alteram por pelo menos um ciclo do sinal da frequência fundamental. A técnica proposta foi implementada no software MATLAB[®] e testada para taxas de amostragem de 16, 32, 64 e 96 amostras por ciclo, bem como para uma grande gama de transitórios, como faltas monofásicas, bifásicas, bifásicas-terra e trifásicas, além de eventos de entrada de cargas, aberturas mono/bipolares e energização de transformadores. Por fim, ressalta-se a grande robustez e capacidade de classificação da metodologia proposta, a qual atuou corretamente para todos os casos analisados.

Palavras-Chave: Classificação, Detecção, Eventos Transitórios, Proteção, Sistemas Elétricos de Potência.

ABSTRACT

Often, the electrical power systems are exposed to transient disturbances that produce distortions in the current and voltage signals of the network, which may cause the interruption in the supply of energy by the action of protective relays. In this context, various methodologies for detection and classification of transients have already been proposed. However, none of them presented satisfactory performance for all operational and transitory conditions of the electrical power systems. Thus, this study proposes the enhancement of a technique for detection and classification of transitory events. The transient detection occurs when an acceptable limit value for normal operating conditions of the system is exceeded in one of the plans, corresponding to the current and voltage signals of the network, for at least one of the phases. From the detection of transient, it enters in the classification stage, which is made in accordance with the patterns recorded for each type of transiente event measured in relation to the behavior of the Euclidean distances in the already mentioned plans. To do this, it is necessary to use three levels, both for the current and voltage signals, which, when exceeded in accordance with the pattern observed for each waveform, characterize certain transitory. The classification is established when the patterns detected do not change by at least one cycle of the signal fundamental frequency. The proposed technique was implemented in software MATLAB[®] And tested for sampling rates of 16, 32, 64 and 96 samples per cycle, as well as for a wide range of transients, such as single-phase, phase-to-phase and, three-phase short-circuits, as well as events of load change, mono/bipolar openings and transformers energization. Finally, it should be emphasized the great robustness and ability to classification of the proposed methodology, which acted correctly in all analyzed signals.

Keywords: Classification, Detection, Transient Events, Protection, Electric Power System.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Tipos de Curtos-Circuitos.....	21
Figura 2: Circuito Equivalente Thevenin.....	23
Figura 3: Período de corrente de curto-circuito	24
Figura 4: Padrão do sinal de corrente para curto-circuito monofásico	25
Figura 5: Padrão do sinal de tensão para curto-circuito monofásico	25
Figura 6: Padrão do sinal de corrente para curto-circuito bifásico	26
Figura 7: Padrão do sinal de tensão para curto-circuito bifásico	26
Figura 8: Padrão do sinal de corrente para curto-circuito trifásico	27
Figura 9: Padrão do sinal de tensão para curto-circuito trifásico	27
Figura 10: Padrão do sinal de corrente abertura monopolar	28
Figura 11: Padrão do sinal de corrente abertura bipolar	29
Figura 12: Curva de histerese BxH do transformador	30
Figura 13: Corrente de inrush no transformador	31
Figura 14: Fluxograma do algoritmo de detecção e classificação de transitórios	41
Figura 15: Sistema teste utilizado para as simulações	44
Figura 16: Sinais de corrente de um curto-circuito trifásico em 20% da linha de transmissão e com ângulo de 30° de carregamento inicial	46
Figura 17: Sinais de tensão de um curto-circuito trifásico em 20% da linha de transmissão e com ângulo de 30° de carregamento inicial	46
Figura 18: Resultados da classificação pra corrente de curto-circuito trifásico	47
Figura 19: Resultados da classificação pra tensão de curto-circuito trifásico	47
Figura 20: Sinais de corrente de um curto-circuito bifásico em 20% da linha de transmissão e com ângulo de 30° de carregamento inicial	48
Figura 21: Sinais de tensão de um curto-circuito bifásico em 20% da linha de transmissão e com ângulo de 30° de carregamento inicial	49
Figura 22: Resultados da classificação pra corrente de curto-circuito bifásico	49

Figura 23: Resultados da classificação pra corrente de curto-circuito bifásico	50
Figura 24: Sinais de corrente de um curto-circuito monofásico em 20% da linha de transmissão e com ângulo de 30° de carregamento inicial	51
Figura 25: Sinais de tensão de um curto-circuito monofásico em 20% da linha de transmissão e com ângulo de 30° de carregamento inicial	51
Figura 26: Resultados da classificação pra corrente de curto-circuito monofásico ...	52
Figura 27: Resultados da classificação pra corrente de curto-circuito monofásico ...	52
Figura 28 Sinais de corrente da abertura monopolar	53
Figura 29: Sinais de corrente da abertura bipolar	54
Figura 30: Resultados da classificação pra corrente de abertura monopolar.....	54
Figura 31: Resultados da classificação pra corrente de abertura bipolar	55
Figura 32: Curva de histerese, software EMTP-ATP	56
Figura 33: Energização do transformador	56
Figura 34: Energização do transformador sob carga	57
Figura 35 Resultados da classificação pra corrente de energização do transformador	57
Figura 36 Resultados da classificação pra corrente de energização do transformador sob carga	58
Figura 37: Sinal de corrente da entrada de carga monofásica	59
Figura 38: Sinal de corrente da entrada de carga bifásica	60
Figura 39 Sinal de corrente da entrada de carga trifásica	60
Figura 40: Resultados da classificação pra corrente de entrada de carga monofásica	61
Figura 41: Resultados da classificação pra corrente de entrada de carga bifásica...	61
Figura 42: Resultados da classificação pra corrente de entrada de carga trifásica...	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Ocorrência de faltas no SEP, período de 10anos	22
Tabela 2: Detecção de curto-circuito 3ϕ	37
Tabela 3: Detecção de curto-circuito 2ϕ	38
Tabela 4: Detecção de curto-circuito 1ϕ	39
Tabela 5: Detecção das aberturas	39
Tabela 6: Detecção de transitórios envolvendo o transformador	40
Tabela 7: Parâmetros do sistema utilizado para simulação	44
Tabela 8: Resultados da classificação para as aberturas	55
Tabela 9: Resultados da classificação para energização de transformador	58
Tabela 10: Resultados da classificação para entrada de carga no secundário do transformador	62

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

UNIPAMPA – Universidade Federal do Pampa

SEP – Sistema Elétrico de Potência

CC – Curto-Circuito

LT – Linha de Transmissão

ATP – *Alternative Transient Program*

EMTP – *Electromagnetic Transients Program*

NBR – Norma Brasileira

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

RNA – Rede Neural Artificial

DWT – *Discrete Wavelet Transforms*

TW – Transformada Wavelet

IEEE – *Institute of Electrical and Electronics Engineers*

FIS – *Fuzzy Inference Systems*

MLP – *Multilayer Perceptron*

PDS – Processador Digital de Sinal

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 Considerações Gerais.....	16
1.2 Motivação.....	17
1.3 Revisão Bibliográfica.....	17
1.4 Objetivos.....	20
1.5 Estrutura do Trabalho.....	20
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
2.1 Considerações Gerais.....	21
2.2 Curto - Circuito	21
2.3 Abertura Monopolar/Bipolar	28
2.4 Energização de Transformadores.....	29
2.5 Considerações Finais	31
3 METODOLOGIA PARA DETECÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE TRANSITÓRIO EM SEP	32
3.1 Considerações Gerais.....	32
3.2 Metodologia proposta por Deliberalli (2014).....	32
3.3 Detecção de Transitórios.....	33
3.4 Classificação de Transitórios.....	36
3.5 Considerações Finais	42
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	43
4.1 Considerações Gerais.....	43
4.2 Sistema Teste	43
4.3 Resultados para curto-circuito	45
4.3.1 Curto-Circuito Trifásico	45
4.3.2 Curto-Circuito Bifásico	48

4.2.3 Curto-Circuito Monofásico	50
4.4 Abertura Monopolar e Bipolar	53
4.5 Energização de Transformador.....	55
4.6 Entrada de carga no secundário do transformador	58
5 CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	63
5.1 CONCLUSÃO	63
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	64
6 REFERÊNCIAS.....	65
7 APÊNDICES	68

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Gerais

Os sistemas elétricos de potência (SEPs) são de extrema importância e se fazem necessários para o transporte de energia da geração até o ponto de consumo. Por sua vez, o sistema de proteção tem por objetivo assegurar a integridade dos equipamentos que compõem os sistemas elétricos de potência, eliminando curtos-circuitos e condições anormais de carga e desligando os trechos comprometidos da rede. Entretanto, alguns transitórios podem provocar a atuação indevida dos dispositivos de proteção, podendo ocasionar o desligamento desnecessário de grandes trechos do sistema. Nesse contexto, torna-se essencial que os relés numéricos de proteção tenham incorporados em suas lógicas, metodologias capazes de detectar e classificar os diferentes tipos de transitórios aos quais o sistema elétrico de potência está sujeito.

Sendo assim, faz-se necessário o estudo e a simulação de diferentes eventos, de modo a se conhecer as características de variação dos parâmetros da rede em função da ocorrência desses distúrbios. Dentre os principais transitórios a serem classificados pelos relés, destacam-se os curtos-circuitos, entradas de carga e aberturas monopolares. Também, destacam-se a energização de transformadores, Filho (2011). Ressalta-se que esses transitórios provocam alterações características nas formas de onda de tensão e de corrente, podendo ser classificados com o auxílio de ferramentas matemáticas e computacionais adequadas.

Nesse contexto, diversas metodologias para detecção e classificação de transitórios já foram propostos na literatura especializada. Tais metodologias fundamentam-se em técnicas matemáticas e computacionais de processamento de sinais, em tempo contínuo ou discreto, uma vez que os sinais podem ser decompostos em suas componentes de frequência. Dentre estas, destacam-se aquelas fundamentadas em Transformada Wavelet Discreta (TWD) associadas a uma Rede Neural Artificial (RNA). Métodos fundamentados em algoritmos de Fourier e outras técnicas de processamento de sinais também foram propostas. Apesar da grande gama de propostas para a solução do problema da detecção e classificação adequada dos transitórios, nenhuma destas consolidou-se como viável para aplicação em todos os Sistemas Elétricos de Potência, haja vista a grande variedade

de condições operacionais dos SEPs e a aleatoriedade da ocorrência dos fenômenos transitórios na rede.

Sendo assim, este trabalho propõe um aprimoramento da metodologia para detecção e classificação de transitórios propostos por Deliberalli (2014), a qual era eficaz para uma pequena variedade de transitórios. A proposta atual expande a capacidade de detecção e classificação para transitórios que não foram abordados pela metodologia original, aumentando assim a robustez da referida técnica. Por fim, cabe ressaltar que este aprimoramento apresentou grande capacidade de detecção e classificação dos transitórios para todos os casos analisados.

1.1 Motivação

Tendo em vista que inúmeros fatores afetam a eficácia dos métodos existentes para a detecção e classificação de transitórios, tais como a resistência da falta, a distância da falta, o ângulo de incidência da falta, presença de ruídos nos sinais, entre outros, faz-se necessário o contínuo desenvolvimento de técnicas destinadas a este fim, de modo a cobrir as deficiências dos métodos existentes, em termos de desempenho frente às variadas condições operacionais do SEP.

Essa importância se destaca uma vez que a localização e classificação de faltas em SEPs são suma importância para as concessionárias de energia elétrica, as quais necessitam desses métodos para auxiliá-las no isolamento dos elementos faltosos em um menor tempo possível, bem como na criação de medidas preventivas e no deslocamento de equipes de manutenção. Por fim, é importante ressaltar que a caracterização da falta capacita as equipes de manutenção à reparação dos equipamentos faltosos, possibilitando então a retomada da operação normal do sistema em um curto espaço de tempo (SOUZA, 2009).

1.2 Revisão Bibliográfica

As linhas de transmissão são responsáveis pelo transporte da energia elétrica dos centros geradores aos centros consumidores. A interligação dos centros geradores constitui o chamado sistema de transmissão, o que permite a qualificação na distribuição da energia produzida no país. As linhas de transmissão podem ter

centenas de quilômetros de extensão, sendo que, todas podem favorecer a ocorrência de faltas no sistema elétrico, bem como a ocorrência de outros eventos transitórios. Com isso, existe a necessidade de se adotar sistemas de proteção eficientes, de forma que as faltas possam ser isoladas rapidamente, garantindo o bom funcionamento do sistema elétrico.

Os transitórios em um sistema de potência, em sua maioria, são resultados de eventos naturais. Exemplos disso são os curtos-circuitos, a energização de transformadores, aberturas de seccionadoras, entrada e saída de carga.

Sendo assim, ressalta-se que os distúrbios em SEP são classificados principalmente como fenômenos de estado estacionário e transitório. Fenômenos de estado estacionário são aqueles onde uma condição de regime permanente se estabelece, tendo vários ciclos de duração. Já os fenômenos transitórios, são caracterizados pela curta duração de alterações de parâmetros da rede elétrica (SLUIS, 2001).

Nesse contexto, sabe-se que os distúrbios transitórios podem provocar a atuação indevida da proteção, causando o desligamento desnecessário de grandes trechos do sistema. A partir do momento que as concessionárias de energia passaram a ser multadas quando da ocorrência de um desligamento não justificado e não programado, surge a necessidade de detectar e classificar esses eventos, de modo que os relés de proteção fiquem bloqueados para eventos nos quais não haja necessidade de atuação da proteção, como no caso da entrada de carga que não viole os níveis de operação do sistema.

A partir da década de 90, com o advento dos relés numéricos, foram publicados os primeiros trabalhos dedicados à detecção e classificação de transitórios em SEP. Assim, em, Altuve e Chacón (1996) é apresentado um método para detecção de faltas em linhas de transmissão baseado redes neurais artificiais. Nesse trabalho, o uso de uma lógica do tipo *Multilayer Perceptron* (MLP) é proposta para a classificação de transitórios.

Já nos anos 2000, o trabalho de (Kim et al., 2002) apresenta um método fundamentado na Transformada *Wavelet* Discreta, no qual são somados os coeficientes da transformada aplicada a um ciclo dos sinais de corrente da rede. O valor desse somatório é comparado com um limiar pré-definido, detectando a falta toda vez que o valor do somatório for maior do que o valor ajustado por um intervalo de tempo equivalente a um ciclo da frequência fundamental. Com essa lógica de

decisão, a falta deve persistir durante um determinado tempo, de forma que o algoritmo evita a detecção de falsas faltas, como os transitórios provocados por comutação de cargas.

Ressalta-se que nessa época, graças aos avanços tecnológicos na área dos microprocessadores, técnicas computacionais de grande complexidade e carga computacional, as quais são capazes de decompor sinais tanto no domínio do tempo como no da frequência, passaram a ser aplicadas para a detecção e classificação de transitórios. São exemplos disso as técnicas de morfologia matemática, morfologia esquelética, algoritmos de Fourier modificados, método dos mínimos quadrados, redes neurais artificiais combinada com RNAs e filtros de Kalman, aplicadas respectivamente em Zacharias et al. (2004), Araujo e Neves (2005), Vanamadevi et al. (2008), Ravindranatah (2009), Gomes (2011) e Al Kabubjie (2012).

Além disso, (Silva et al., 2006), propôs um algoritmo que é dividido em dois módulos, sendo um de detecção e outro de classificação da falta. No módulo de detecção, as formas de onda de tensão e corrente são obtidas. Em seguida, aplicam-se lógicas computacionais nos sinais. Forma-se, um conjunto de regras que é avaliado para identificar se o registro corresponde a uma falta. O ponto que se destaca nesta metodologia é a possibilidade de diferenciar uma falta de outras, tais como afundamentos de tensão e os transitórios de chaveamento.

Abollahi e Seyedtabaii (2010) propuseram um método no qual se aplicam as Transformadas de Fourier e Wavelet Discreta para a detecção e classificação do transitório.

Nesse contexto, é importante ressaltar que, embora algumas lógicas computacionais apresentem um bom desempenho na análise dos transitórios, existem muitos problemas em aberto para serem analisados. Em muitas aplicações os resultados de uma Transformada Wavelet, por exemplo, contém um grande número de dados que necessitam de tratamento posterior. Dessa forma, torna-se um pouco mais difícil a etapa da detecção e classificação de faltas (HE; BO, 2010).

Pode-se destacar ainda o trabalho de Das e Reddy (2005), o qual apresenta um método para classificação de faltas em linhas de transmissão baseado em lógica computacional propondo um algoritmo de classificação que emprega a diferença angular entre as componentes de sequência das correntes de falta, e as magnitudes, como informações sobre a falta.

Por fim, deve-se ressaltar que, embora apresentem bons resultados, nenhuma das técnicas propostas até o momento foi consolidada como universal, uma vez que são restritas a certas condições operacionais, haja vista a grande dificuldade em se abranger todas as possibilidades de operação do SEP. Tendo em vista essas deficiências, a proposta apresentada nesse trabalho foi desenvolvida de modo a ser mais robusta e eficiente na detecção e classificação de transitórios.

1.3 Objetivos

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

- Estudar os fenômenos transitórios;
- Implementar um sistema teste no *software* EMTP-ATP[®] para simulação dos transitórios;
- Criar um banco com os sinais de corrente e tensão obtidos através das simulações;
- Implementar lógica para detecção e classificação no *software* MATLAB[®].

1.4 Estrutura do trabalho

Este trabalho está estruturado da seguinte forma: no Capítulo 2, apresenta-se a fundamentação teórica, discutindo os conceitos que formaram a base para a elaboração do sistema teste e da técnica proposta.

No Capítulo 3, descreve-se a técnica desenvolvida, bem como o sistema teste implementado.

No Capítulo 4, são expostos e discutidos os resultados obtidos pela técnica proposta ao processar os sinais do banco de dados.

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

2 Fundamentação Teórica

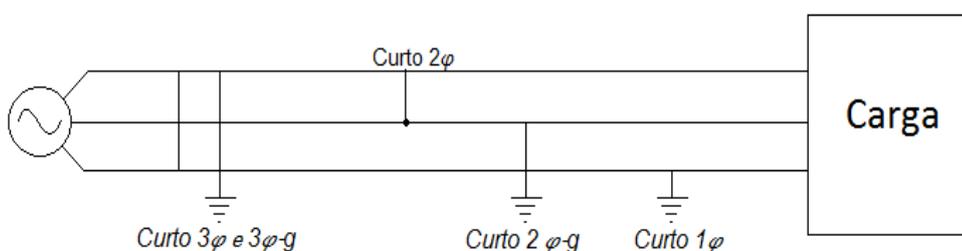
2.1 Considerações Gerais

O entendimento a cerca dos fenômenos transitórios em SEP é essencial para o desenvolvimento de metodologias capazes de detectá-los e classifica-los a partir dos sinais de corrente e tensão da rede. Portanto, o foco desse Capítulo é apresentar os conceitos fundamentais a cerca de cada transitório, incluindo as causas e as consequências desses eventos com relação ao SEP.

2.2 Curto-Circuito

Os eventos transitórios mais nocivos a o sistema elétrico é o curto-circuito, esses transitórios são geralmente chamados de defeitos ou faltas e ocorrem de maneira aleatória nos sistemas elétricos. Suas consequências podem ser extremamente danosas se não forem eliminados rapidamente pelos dispositivos de proteção. Os tipos de curtos-circuitos podem ser observados na Figura 1.

Figura 1 – Tipos de curtos-circuitos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os curtos-circuitos podem ser classificados em quatro categorias distintas. São elas:

1. Curto-circuito trifásico ou simétrico (3ϕ ou $3\phi - g$)

Este tipo de curto-circuito envolve as 3 fases e não provoca desequilíbrio no sistema. Ou seja, admite-se que todos os condutores da rede conduzem o mesmo valor eficaz da corrente de curto. Seu cálculo pode ser efetuado por fase,

considerando apenas o circuito equivalente de sequência positiva, sendo indiferente se o curto envolve ou não o condutor neutro ou a terra.

2. Curto-Circuito bifásico (2ϕ)

É um curto assimétrico, ou seja, desequilibrado, envolvendo duas fases do sistema. Seu cálculo é realizado com o uso de componentes simétricas.

3. Curto-Circuito bifásico-terra ($2\phi - g$)

Também é assimétrico, envolvendo contato com a terra e duas fases do sistema.

4. Curto-Circuito monofásico (1ϕ)

Curto assimétrico, envolvendo uma das fases do sistema e a terra.

Além disso, os curtos- circuitos são classificados de acordo com sua duração, podendo ser, temporários que desaparecem após a atuação da proteção, permitindo o restabelecimento imediato do sistema (exemplo: galho tocando um alimentador); ou, permanente que exigem a intervenção de equipes de manutenção antes que se possa religar o sistema (exemplo: rompimento e queda de uma linha de transmissão). Com isso abaixo uma tabela de ocorrência de faltas no SEP em um período de dez anos no Brasil.

Tabela 1. Ocorrência de faltas no SEP, período de 10 anos.

Setor do sistema elétrico	Número de Faltas
Linhas de transmissão	82
Circuitos disjuntores	4
Autotransformadores	6
Barramentos	1
Geradores	1
Falha humana	5

Fonte: Coury (2002).

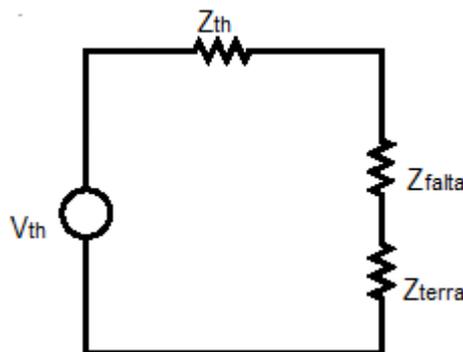
Estudos estáticos indicam os seguintes valores médios para a ocorrência dos diferentes tipos de curto-circuito em sistemas de potência:

- ⇒ Curtos-circuitos 3 Φ – 5%;
- ⇒ Curtos-circuitos 2 Φ – 15%;
- ⇒ Curtos-circuitos 2 Φ -g – 10%;
- ⇒ Curtos-circuitos 1 Φ – 70%.

Fonte: Coury (2002).

Nos cálculos de curto-circuito, aplica-se o Teorema de Thevenin. Para tal, utiliza-se a tensão pré-falta como V_{Th} . A impedância de Thevenin (Z_{th}) é igual à impedância equivalente vista do posto onde ocorre o curto-circuito com as fontes de tensão curto-circuitadas. Além disso, uma impedância de falta ou de arco e até uma impedância de terra podem ser consideradas. O circuito equivalente Thevenin pode ser visualizado na figura 2.

Figura 2 – Circuito Equivalente Thevenin.



Fonte: Elaborado pelo autor.

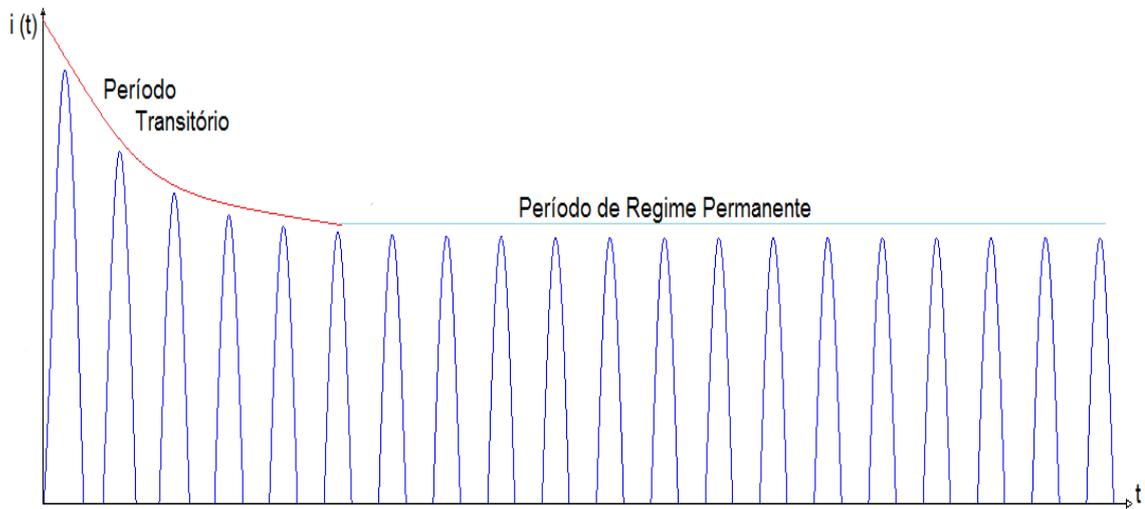
Com a análise do circuito pode-se realizar o cálculo de corrente de curto-circuito trifásico através da equação:

$$I_{cc3\Phi} = \frac{V_{préfalta}}{Z_{th} + Z_{falta} + Z_{terra}} \quad (1)$$

Na prática, as correntes de curto-circuito costumam ser assimétrico é mostrado na Figura 3, expõem um pico elevado no período transitório até entrar em regime permanente em poucos segundo, isso se da através da componente unidirecional

exponencialmente decrescente. Após a incidência da falta, ocorre aumento no intervalo de tempo, a frequência com valor nominal de 60Hz, sofre incremento não constante, até que a corrente de curto-circuito atinja o regime permanente.

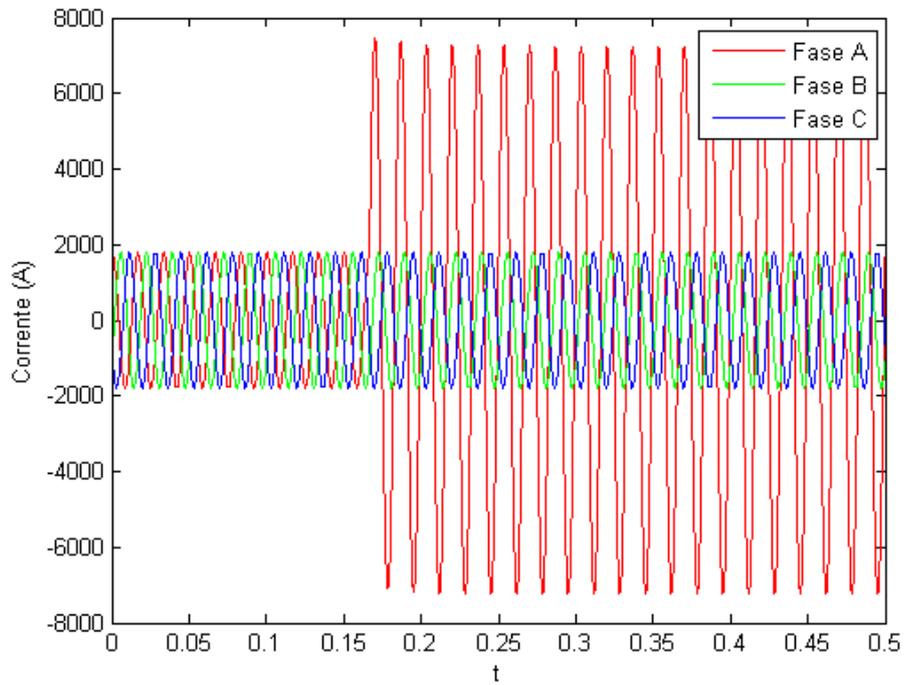
Figura 3 – Períodos de corrente de curto-circuito.



Fonte: Elaborado pelo autor.

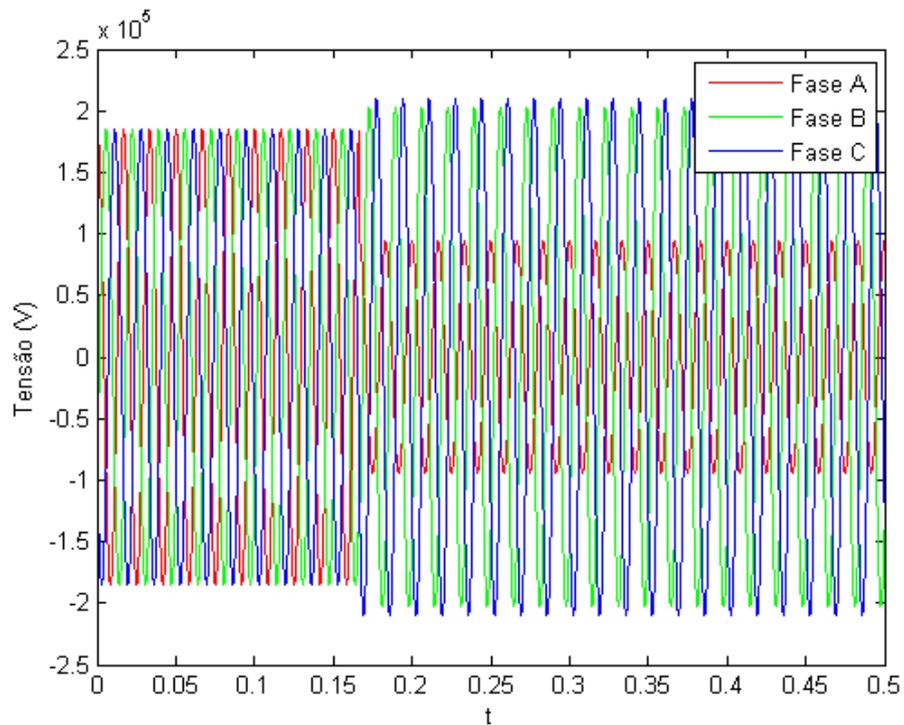
Como analisado anteriormente como fica os sinais de corrente na prática, do mesmo modo é analisado para as formas de onda de tensão, neste caso nota-se um afundamento na fase em falta e um acréscimo nas outras fases. Então se analisa um padrão nos eventos simulados, a uma pequena variação quando são submetidas a diferentes distâncias e ângulos de carregamento inicial. Assim se vê para os curtos-circuitos monofásicos simulado no sistema pelas Figuras 4 e 5.

Figura 4 – Padrão do sinal de corrente para curto-circuito monofásico.



Fonte: Elaborado pelo autor.

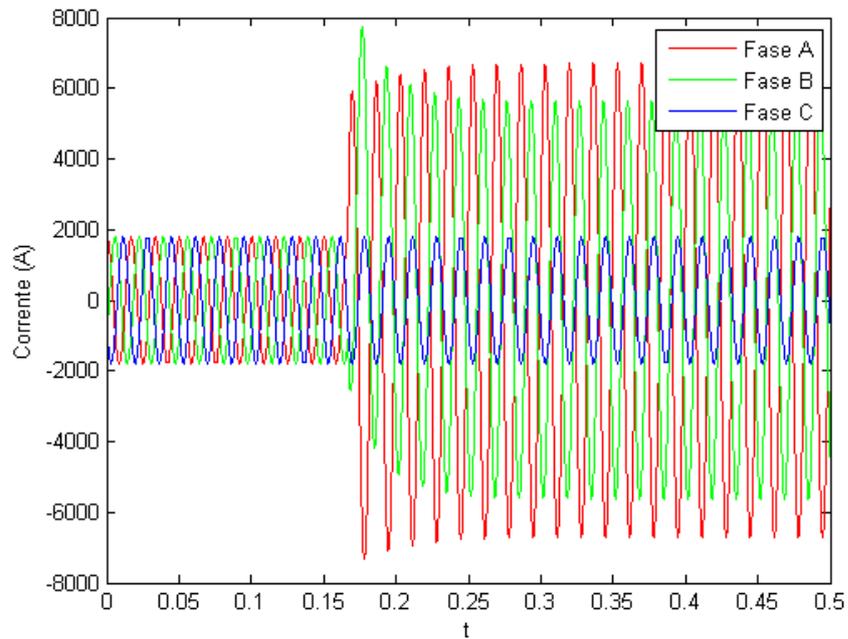
Figura 5 – Padrão do sinal de tensão para curto-circuito monofásico.



Fonte: Elaborado pelo autor.

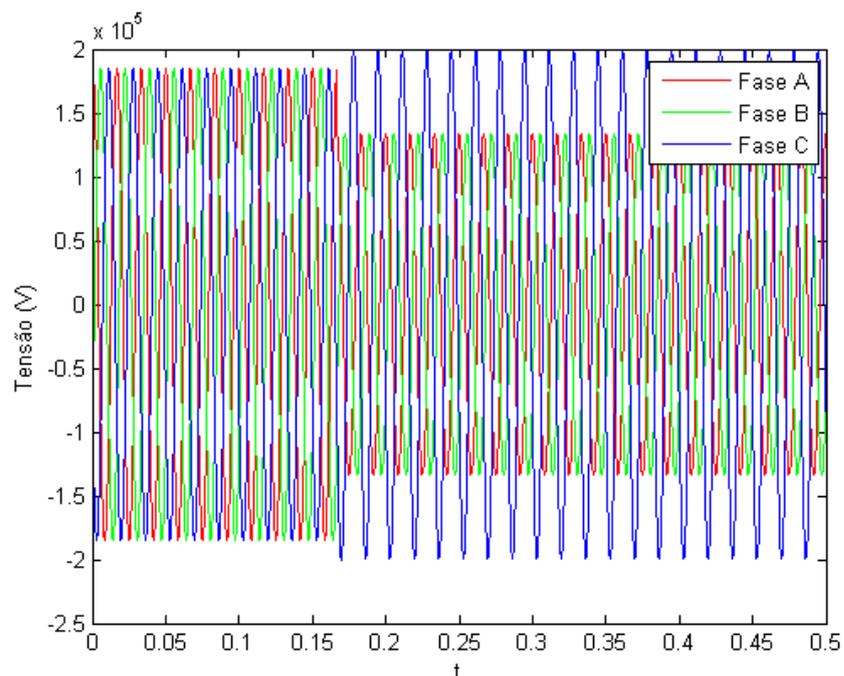
Do mesmo modo os padrões estabelecidos são mostrados a seguir, pelas figuras 6 e 7 para os curtos-circuitos bifásicos e pelas figuras 8 e 9 para os curtos-circuitos trifásicos.

Figura 6 – Padrão do sinal de corrente para curto-circuito bifásico.



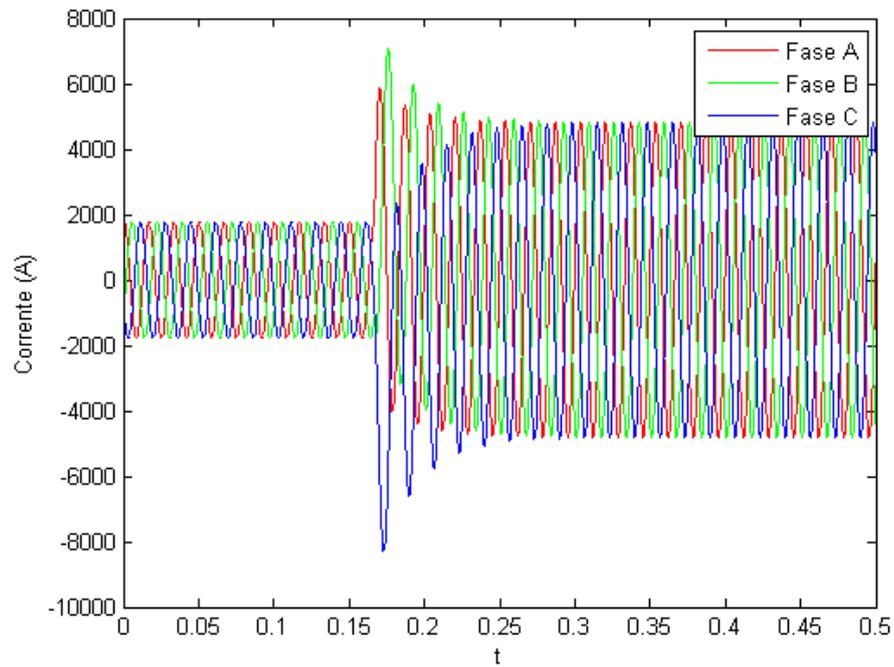
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 7 – Padrão do sinal de tensão para curto-circuito bifásico.



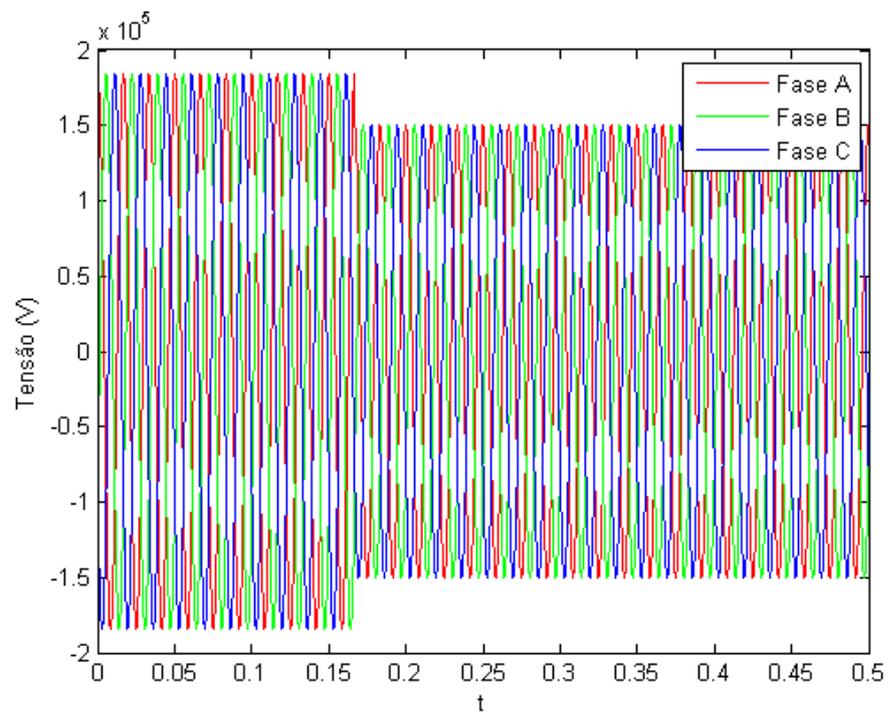
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 8 – Padrão do sinal de corrente para curto-circuito trifásico.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 9 – Padrão do sinal de tensão para curto-circuito trifásico.



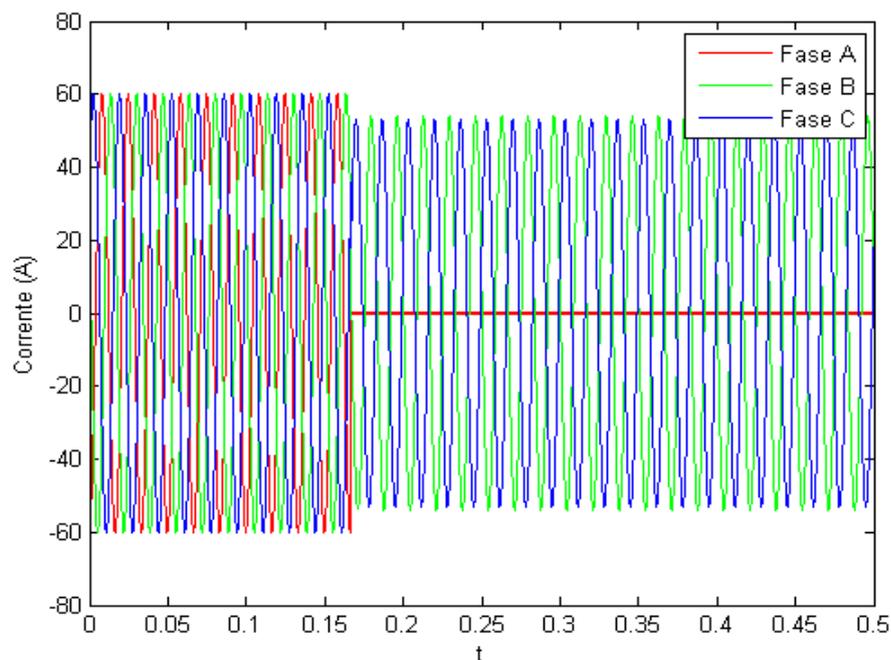
Fonte: Elaborado pelo autor.

2.3 Abertura Monopolar/Bipolar

As aberturas são oriundas de defeito em fusíveis, assegura a transmissão ininterrupta da fase em falta por uma fração importante de energia através das outras duas fases que não foram afetadas pela falta, o que reduz consideravelmente a severidade da perturbação. Um dos parâmetros importantes para que a simulação tenha uma alta probabilidade de sucesso é que a corrente de falta que é mantida pelo acoplamento entre as fases sem defeito e a fase aberta tenham uma baixa amplitude criando-se uma corrente de arco secundário.

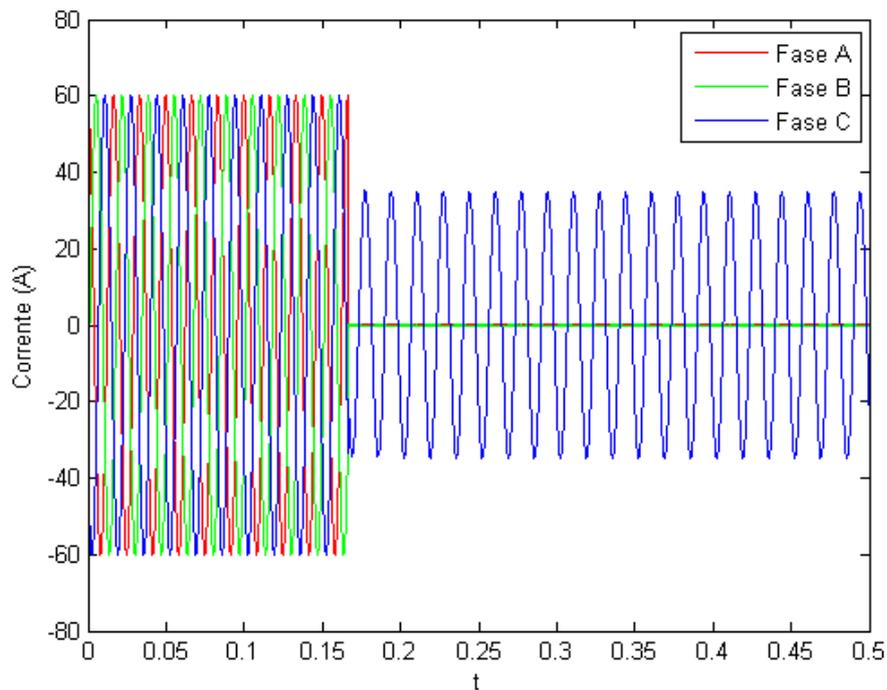
Nas Figuras 10 e 11 resalta a corrente de defeito que ocorre no caso de uma abertura monofásica e bifásica para a terra em uma linha de transmissão, quando um arco elétrico se estabelece entre a fase e a terra enquanto não ocorre a abertura dos disjuntores associados a fase submetida a falha, o arco elétrico estabelecido é alimentado pelo sistema de potência, atingindo valores de pico de 60 A até 1500 A, dependendo do carregamento inicial. Após a abertura dos disjuntores da fase em falta, o sistema para de alimentar de forma direta o arco elétrico, tendo então a queda brusca no valor de corrente para as fases com defeito e um leve afundamento nas outras fases.

Figura 10 – Padrão do sinal de corrente para abertura monofásica.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 11 – Padrão do sinal de corrente para abertura bifásica.



Fonte: Elaborado pelo autor.

2.4 Energização de Transformadores

O processo de energização de um transformador também são causas de fenômeno transitório. Torne-se imprescindível a modelagem das características de energização especialmente no fenômeno da magnetização dos transformadores que estão presentes no sistema elétrico, considerando os efeitos da saturação e histerese magnética. O campo magnético H é definido com a soma do campo sem histerese e o campo da histerese. Portanto o campo sem histerese é calculado pela equação abaixo, conhecida também pela função de Langevin.

$$H = H_{an} + H_h \quad (2)$$

Onde:

H é campo magnético

H_{an} é o campo magnético sem histerese

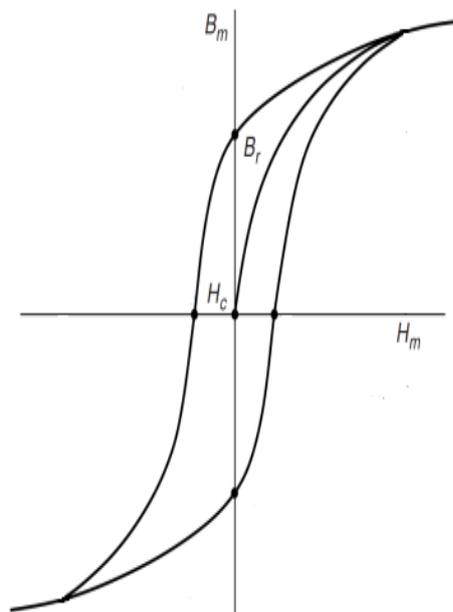
H_h é o campo magnético de histerese

A Figura 12 mostra a curva indução magnética (B) x campo magnético (H), quando o campo magnético é obtido pela função de Langevin respectivamente.

Quando um transformador é inicialmente energizado, durante um pequeno período surge uma corrente de grande amplitude no enrolamento, conhecida como uma corrente de energização ou corrente de *inrush*, a corrente é assimétrica como visto no exemplo de curto-circuito, neste caso o comportamento da forma de onda é semelhante, também contém uma componente DC que leva poucos segundos para desaparecer até entrar em regime permanente, como se pode analisar na Figura 13.

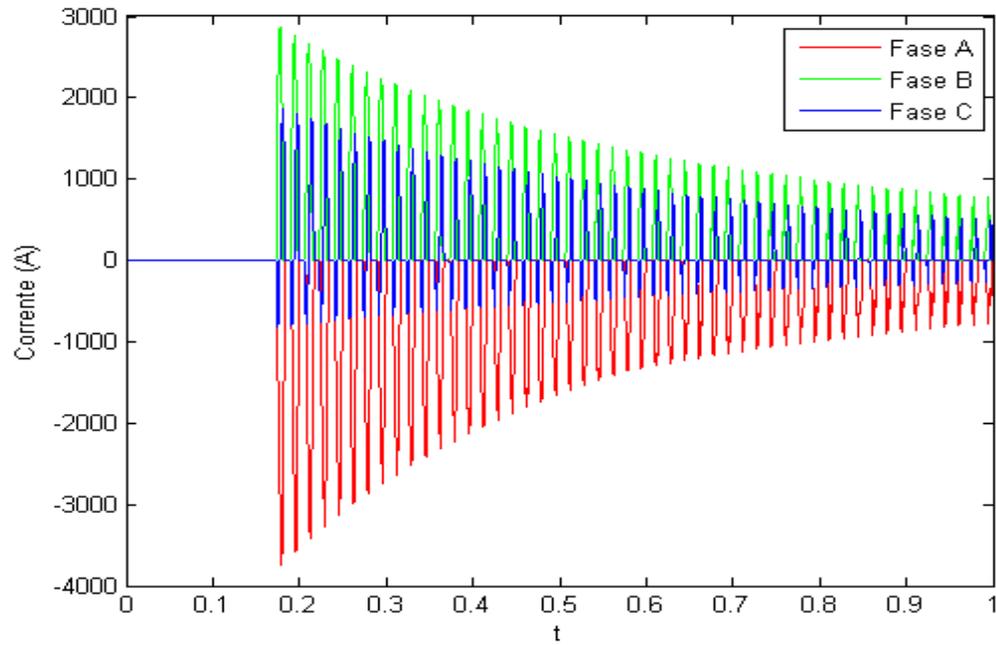
Sem um estudo aprofundado neste contexto pode ser feito um mau dimensionamento do transformador, e as correntes de *inrush* podem até não causar deficiência no transformador, pode causar efeitos indesejáveis nos equipamentos de proteção, as formas de onda de tensão ficam com deformação momentânea, além das falhas em inversores entre outros equipamentos que são mais sensíveis. Alguns trabalhos que se aprofundaram neste problema são Neves e Dommel (1993) e Al-khalifah e El-saadany (2006).

Figura 12 - Curva de histerese BxH do transformador.



Fonte: Sluis (2001).

Figura 13 - Corrente de inrush do transformador.



Fonte: Elaborado pelo Autor

2.5 Considerações Finais

No presente Capítulo, foram abordados os principais conceitos a cerca dos transitórios aos quais os SEPs estão suscetíveis. Também foram discutidas as principais características.

3 METODOLOGIA PARA DETECÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE TRANSITÓRIOS EM SEP

3.1 Considerações Gerais

Os eventos transitórios podem implicar na operação dos relés de proteção, uma vez que detectado esses fenômenos podem ser processados pelos respectivos dispositivos de proteção. Com o auxílio dos *softwares* as metodologias utilizando ferramentas computacionais ou matemáticas, têm sido aplicadas para garantir a boa atuação dos sistemas de proteção, tornando os o sistema elétricos mais confiáveis e seguros.

O presente Capítulo apresenta um aprimoramento de técnica para detecção e classificação de eventos transitórios e suas formas de onda da corrente e tensão, que ocorrem em uma linha de transmissão.

3.2 Metodologia proposta por Deliberalli (2014)

Para obtenção dos sinais utilizados para avaliação da metodologia de detecção e classificação de transitórios, um sistema elétrico de potencia composto de uma linha de transmissão de 230 kV com 100 km de extensão, foi simulado no EMTP-ATP, os curtos-circuitos trifásicos, bifásicos e monofásicos em pontos distintos da linha de transmissão, sendo estes localizados em 25%, 50%, 75% e 100% da LT.

A partir dos sinais obtidos na simulação, são calculadas as funções diferença para cada sinal, conforme as Equações 3 e 4, onde a primeira representa a função diferença para os sinais de corrente e a segunda, para os sinais de tensão.

$$del1_x(n, 1) = I_x(n, 1) - I_x(n - 1, 1) \quad (3)$$

$$del2_x(n, 1) = V_x(n, 1) - V_x(n - 1, 1) \quad (4)$$

Posteriormente são calculadas as distâncias euclidianas dos pontos resultantes da função transferência do sinal amostrado pelas Equações 5 e 6.

$$dist1_x(n, 1) = \sqrt{((del1_x(n, 1) - del1_x(n - 1, 1))^2 + (Ix(n, 1) - Ix(a - 1, 1))^2)} \quad (5)$$

$$dist2_x(n, 1) = \sqrt{((del2_x(n, 1) - del2_x(n - 1, 1))^2 + (Ix(n, 1) - Ix(a - 1, 1))^2)} \quad (6)$$

Após a realização dos cálculos das distâncias euclidianas entre os pontos, são estabelecidos dois níveis de detecção, sendo um nível inferior e um nível superior. Os níveis de detecção são calculados através da média de um conjunto contendo 16 multiplicações do desvio padrão desse mesmo conjunto. O nível superior de detecção para os sinais de corrente e tensão é estabelecido pela Equação 7. E para o nível inferior os sinais são estabelecidos pela Equação 8.

$$TH_x(n, 1) = \mu(jan_x(a)) + 2 * \sigma(jan_x(a)) \quad (7)$$

$$TL_x(n, 1) = \mu(jan_x(a)) + 1,3 * \sigma(jan_x(a)) \quad (8)$$

A classificação dos eventos ocorridos no sistema se dá de acordo com os comportamentos dos sinais observados na fase de detecção. O algoritmo aguarda por um tempo de 2 ciclos antes de realizar a classificação. Se neste espaço de tempo o sinal não retornar ao seu nível normal de operação, fica comprovada a ocorrência de um transitório. Quando um dos níveis mencionados anteriormente for ultrapassado, um sinal de nível lógico alto irá ativar uma *flag*. Cada nível de detecção possui seis *flags*. Para o Nível 1 de detecção são três *flags* para sinais de corrente (uma para cada fase) e mais três para os sinais de tensão. Para o Nível 2 de detecção, são adotados os mesmos critérios.

Para cada fenômeno simulado foram observados padrões, ou seja, cada evento ocorrido no sistema possui um comportamento padrão e isso foi observado em várias simulações realizadas com diferentes configurações e parâmetros de sistema. Esse padrão de comportamento dos sinais, permite criar uma lógica de decisão que irá determinar o que está acontecendo no sistema no momento da ocorrência de um transitório.

3.3 Detecção de transitórios

A metodologia para detecção dos eventos transitórios foi implementada no *software* MATLAB[®]. Para tal, primeiramente, é feito o cálculo da primeira função

diferença para os sinais de corrente das fases A, B e C, respectivamente, conforme as Equações descritas em (9), (10) e (11).

$$\text{del1}I_A = I_A(a) - I_A(a - 1) \quad (9)$$

$$\text{del1}I_B = I_B(a) - I_B(a - 1) \quad (10)$$

$$\text{del1}I_C = I_C(a) - I_C(a - 1) \quad (11)$$

Analogamente, também são realizados os cálculos da primeira função-diferença dos sinais de tensão da rede, de acordo com as Equações (12), (13) e (14).

$$\text{del1}V_A = V_A(a) - V_A(a - 1) \quad (12)$$

$$\text{del1}V_B = V_B(a) - V_B(a - 1) \quad (13)$$

$$\text{del1}V_C = V_C(a) - V_C(a - 1) \quad (14)$$

Nas equações acima, (a) representa a amostra atual a qual devem ser associados os valores de del1.

Em seguida, cada valor amostrado dos sinais de tensão e corrente é disposto como par ordenado juntamente com o valor correspondente de sua função-diferença, formando um plano dado por V ou I versus del1. A partir daí, são calculadas as distâncias euclidianas entre dois pontos consecutivos em cada plano, sendo que, para a fase A, tais distâncias são dadas pelas Equações 15 e 16, para os planos $I_A \times \text{del1}_{IA}$ e $V_A \times \text{del1}_{VA}$. De forma semelhante, são calculadas as distâncias para os respectivos planos associados às demais tensões e correntes da rede.

$$\text{dist1}_A(a) = \sqrt{((\text{del1}_{IA}(a) - \text{del1}_{IA}(a - 1)))^2 + (IA(a) - IA(a - 1))^2} \quad (15)$$

$$\text{dist1}_A(a) = \sqrt{((\text{del1}_{VA}(a) - \text{del1}_{VA}(a - 1)))^2 + (VA(a) - VA(a - 1))^2} \quad (16)$$

Para cada plano, são estipulados três patamares para detecção de transitórios, que, quando ultrapassados, caracterizam a ocorrência de um evento de corrente ou tensão. Esses patamares são ajustados aos parâmetros do sinal de forma adaptativa, com base nas características da forma de onda a qual estão

associados. Para tal, faz-se necessário o uso de uma janela móvel contendo N amostras do respectivo sinal, onde N representa o número de amostras por ciclo, atualizada a cada nova amostra recebida. As Equações (17), (18) e (19) representam o cálculo dos patamares para os sinais de tensão e corrente.

$$TL_{V_{ouI}} = \mu(jan_{V_{ouI}}(a)) + 1.3 * \sigma(jan_{V_{ouI}}(a)) \quad (17)$$

$$TH_{V_{ouI}} = \mu(jan_{V_{ouI}}(a)) + 2 * \sigma(jan_{V_{ouI}}(a)) \quad (18)$$

$$TS_{V_{ouI}} = \mu(jan_{V_{ouI}}(a)) + 3 * \sigma(jan_{V_{ouI}}(a)) \quad (19)$$

Nas Equações acima, TL representa o patamar de nível 1 (mais inferior), TH o patamar de nível 2 (médio) e TS, o de nível 3 (superior). Já, μ e σ representam, respectivamente, a média e o desvio padrão para o conjunto de dentro da janela de dados correspondente. Ressalta-se, que os patamares são calculados para todos os sinais de corrente e tensão das três fases do sistema, sendo analisados de forma independente. Assim, toda vez que o valor limite de um patamar é ultrapassado, fica caracterizado um transitório. Dessa forma, a condição para a detecção de um evento fica estabelecida pelas expressões em (20) a (37).

$$dist1_{IA}(a) > TL_{IA}(a) \quad (20)$$

$$dist1_{IA}(a) > TH_{IA}(a) \quad (21)$$

$$dist1_{IA}(a) > TS_{IA}(a) \quad (22)$$

$$dist1_{IB}(a) > TL_{IB}(a) \quad (23)$$

$$dist1_{IB}(a) > TH_{IB}(a) \quad (24)$$

$$dist1_{IB}(a) > TS_{IB}(a) \quad (25)$$

$$dist1_{IC}(a) > TL_{IC}(a) \quad (26)$$

$$dist1_{IC}(a) > TH_{IC}(a) \quad (27)$$

$$dist1_{IC}(a) > TS_{IC}(a) \quad (28)$$

$$dist1_{VA}(a) > TL_{VA}(a) \quad (29)$$

$$dist1_{VA}(a) > TH_{VA}(a) \quad (30)$$

$$dist1_{VA}(a) > TS_{VA}(a) \quad (31)$$

$$dist1_{VB}(a) > TL_{VB}(a) \quad (32)$$

$$dist1_{VB}(a) > TH_{VB}(a) \quad (33)$$

$$dist1_{VB}(a) > TS_{VB}(a) \quad (34)$$

$$dist1_{VC}(a) > TL_{VC}(a) \quad (35)$$

$$dist1_{VC}(a) > TH_{VC}(a) \quad (36)$$

$$dist1_{VC}(a) > TS_{VC}(a) \quad (37)$$

3.4 Classificação de transitórios

A classificação dos eventos transitórios é feita com base nos diagnósticos verificados durante a fase de detecção dos mesmos. A cada patamar estabelecido para os sinais de corrente e tensão está associada uma *flag*, a qual é passada para nível lógico alto toda vez que o patamar correspondente é ultrapassado. Dessa forma, são consideradas três *flags* para cada sinal processado, sendo estas salvas em vetores próprios, que são atualizados a cada iteração com o respectivo valor lógico atribuído dentro desta iteração. Também foram criadas *flags* referentes ao valor instantâneo das correntes das fases A, B e C, sendo que estas possuem valor

lógico alto sempre que, no momento da detecção do transitório, o valor arredondado da magnitude do respectivo sinal for maior que zero referida ao primário do transformador de corrente. Isso se fez necessário para a diferenciação entre as aberturas monopolar e bipolar dos demais eventos transitórios, tendo em vista que a corrente é zero nas fases envolvidas para essas aberturas.

Sendo assim, a cada iteração, o conjunto de todas as *flags* atuais é comparado com a tabela lógica de decisão, conseguida através dos padrões verificados para cada tipo de transitório. A classificação final só ocorre quando o padrão atual de flags não se alterar durante um ciclo da frequência fundamental.

É importante ressaltar que a tabela lógica de decisão foi construída com base nos conjuntos de flags verificados para cada tipo de transitório. Na tabela 2, está representado o padrão estabelecido do curto-circuito trifásico, ocorrido em diversos pontos da linha com ângulo de incidência de falta equivalente a 0,1893 s para respectivos sinais de corrente e tensão. Nota-se que para o curto trifásico, todos os níveis de detecção são ultrapassados para os sinais das três fases. Já para os sinais de tensão, percebe-se que as fases B e C sempre ultrapassam os níveis 1 e 2. Para os demais casos de curto-circuito trifásico, o mesmo padrão é verificado, permitindo concluir que a lógica de classificação deste tipo de evento é realizada quando o conjunto de *flags* satisfaz a expressão (a.1) conforme o apêndice A.

Tabela 2 – Detecção de curto-circuito 3 ϕ .

CC	Fases Envolvidas		Corrente			Tensão		
	ABC	Níveis	1	2	3	1	2	3
3 ϕ	A		x	x	x	x	x	
	B		x	x	x	x	x	
	C		x	x	x	x	x	x
0% da LT	A		x	x	x	x	x	
	B		x	x	x	x	x	
	C		x	x	x	x	x	x
20% da LT	A		x	x	x	x	x	
	B		x	x	x	x	x	
	C		x	x	x	x	x	x
50% da LT	A		x	x	x	x	x	
	B		x	x	x	x	x	
	C		x	x	x	x	x	
80% da LT	A		x	x	x	x	x	
	B		x	x	x	x	x	
	C		x	x	x	x	x	
100% da LT	A		x	x	x	x	x	
	B		x	x	x	x	x	
	C		x	x	x	x	x	

Onde, a primeira letra que acompanha a palavra *flag* representa a fase a qual o parâmetro está associado, i ou v dizem respeito ao tipo de sinal (corrente ou tensão, respectivamente) e o número representa o nível de detecção (1, 2 ou 3). As *flags* IA, IB e IC dizem respeito ao valor arredondado da magnitude do sinal de corrente no momento da detecção do transitório.

Analogamente, um exemplo de padrões verificados para a violação dos níveis de detecção para curtos bifásicos, entre as fases AB, é mostrado na Tabela 3. Ressalta-se que os resultados apresentados nessa tabela são referentes à faltas bifásicas ocorridas em 0,1893 s.

Tabela 3 – Detecção de curto-circuito 2 ϕ .

CC 2 ϕ	Fases Envolvidas ABC	Níveis	Corrente			Tensão		
			1	2	3	1	2	3
0% da LT	A		x	x	x			
	B		x	x	x	x	x	
	C					x	x	x
20% da LT	A		x	x	x			
	B		x	x	x	x		
	C					x	x	x
50% da LT	A		x	x	x			
	B		x	x	x			
	C					x	x	
80% da LT	A		x	x	x			
	B		x	x	x			
	C					x	x	
100% da LT	A		x	x	x			
	B		x	x	x			
	C					x	x	

Com base nos resultados da Tabela 3, pode-se perceber que, para as fases em falta, as correntes ultrapassam os três patamares de detecção, não ocorrendo nenhum diagnóstico para a fase restante. Além disso, para os sinais de tensão, pelo menos um dos patamares em uma das fases é violado. Para os demais casos de curto-circuito bifásico, verificam-se os mesmos padrões, permitindo concluir que, para curtos-circuitos bifásicos entre as fases AB, BC e AC, a classificação se dá quando o conjunto de *flags* satisfaz as lógicas expressas em (a.2), (a.3) e (a.4), respectivamente, conforme o apêndice A. Para as faltas bifásicas-terra, a tabela lógica de decisão é a mesma dos curtos bifásicos, exceto que, para as fases envolvidas, o estado lógico para os patamares de nível 3, associados aos sinais de corrente, é baixo.

Na Tabela 4, está representado o padrão estabelecido para o curto-circuito monofásico, na fase A, ocorrido no instante 0,1893 s. Percebe-se que os três níveis

de detecção foram ultrapassados para os sinais de corrente da fase A. Já para os sinais de tensão, pelo menos o *flag* de nível um é ativado para as fases restantes. Padrões semelhantes se verificam para curtos-circuitos monofásicos com diferentes ângulos de incidência de falta, permitindo concluir que a lógica para classificação deste tipo de transitório pode ser feita segundo as lógicas expressas em (a.5), (a.6) e (a.7), conforme no apêndice A, sendo estas, respectivamente, para curtos-circuitos monofásicos envolvendo a fase A, B e C do sistema. Quando o conjunto de *flags* satisfaz as referidas expressões, fica caracterizada a falta correspondente.

Tabela 4 – Detecção de curto-circuito 1 ϕ .

CC 1 ϕ	Fases Envolvidas ABC	Corrente Níveis	Corrente			Tensão		
			1	2	3	1	2	3
0% da LT	A		x	x	x			
	B					x	x	
	C					x	x	
20% da LT	A		x	x	x			
	B					x		
	C					x	x	
50% da LT	A		x	x	x			
	B					x		
	C					x		
80% da LT	A		x	x	x			
	B					x		
	C					x		
100% da LT	A		x	x	x			
	B					x		
	C					x		

Com relação às aberturas monopolares e bipolares, a Tabela 5 apresenta os padrões verificados para estes tipos de eventos, simulados no sistema teste em questão, para o mesmo instante de ocorrência dos curtos-circuitos mencionados anteriormente.

Tabela 5- Detecção das Aberturas.

Eventos Ocorridos	Fase Envolvida ABC	Corrente Níveis	Corrente			Tensão		
			1	2	3	1	2	3
Abertura Monopolar Fase A	A					x	x	x
	B							
	C							
Abertura Bipolar Fase AB	A		x	x	x	x	x	x
	B		x			x	x	x
	C							

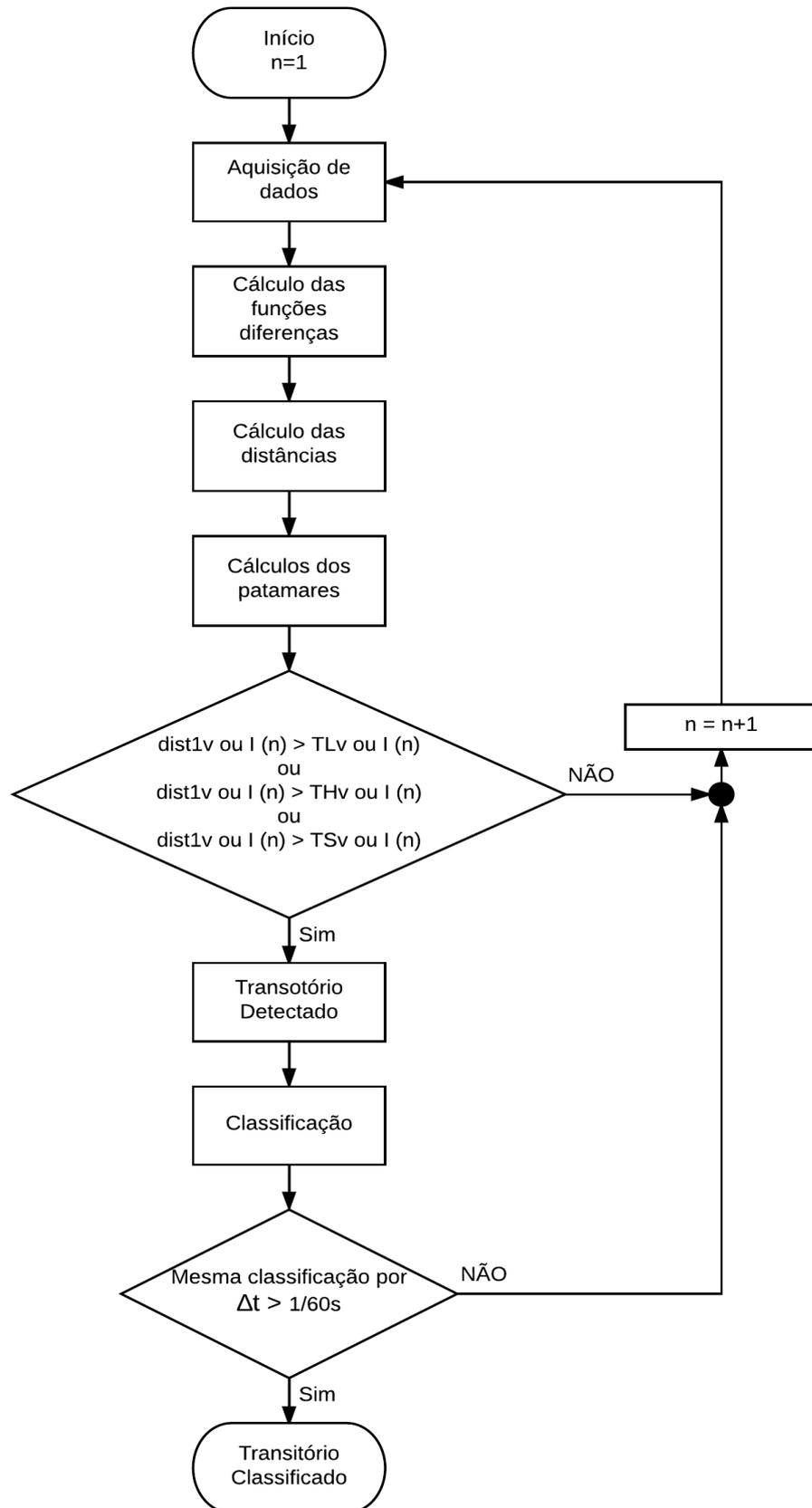
Novamente, ressalta-se que os padrões verificados se mantêm para qualquer caso de abertura monopolar e bipolar, permitindo concluir que as lógicas para classificação são aquelas expressas em (a.8), (a.9) e (a.10), conforme no apêndice A, para aberturas monopolares nas fases A, B e C, respectivamente. Já as aberturas bipolares, envolvendo as fases AB, BC e AC, são classificadas segundo as lógicas das expressões (a.11), (a.12) e (a.13), conforme no apêndice A. Quando o conjunto de flags satisfaz uma destas condições, fica caracterizado o tipo de transitório.

Por fim, para os demais eventos transitórios testados, a Tabela 6 apresenta os respectivos padrões verificados. Para todos os casos testados, os padrões verificados se assemelham, conforme ocorrido para os casos citados anteriormente. Assim, uma energização de transformador a vazio, com carga conectada, uma entrada de carga monofásica, bifásica ou trifásica, no secundário do transformador, é detectada quando o conjunto de *flags* satisfaz as condições expressas em (a.14) a (a.18), conforme no apêndice A. O fluxograma da metodologia é apresentado na Figura 14.

Tabela 6 – Detecção de transitórios envolvendo o transformador.

Eventos Ocorridos	Fase Envolvida ABC	Corrente Níveis	Corrente			Tensão		
			1	2	3	1	2	3
Energização Trafo Sob Carga	A		x	x	x	x	x	
	B		x	x	x	x	x	x
	C		x	x	x	x	x	x
Energização Trafo a Vazio	A		x	x	x	x	x	
	B		x	x	x	x	x	
	C		x	x	x	x	x	
Entrada de Carga Monofásica	A						x	
	B						x	
	C		x					
Entrada de Carga Bifásica	A					x	x	
	B		x				x	
	C		x					
Entrada de Carga Trifásica	A		x			x	x	x
	B		x			x	x	
	C		x			x	x	

Figura 14 – Fluxograma do algoritmo de detecção e classificação de transitórios



Fonte: Elaborado pelo autor

3.5 Considerações Finais

Neste Capítulo, é apresentada a metodologia proposta para a detecção e classificação dos eventos transitórios. Ressalta-se que essas ações são realizadas com base na análise das distâncias euclidianas entre pontos consecutivos nos planos formados pelos pares ordenados dados pelos valores atuais dos sinais de tensão e corrente da rede e suas respectivas funções-diferença. Um transitório é detectado quando o valor das respectivas distâncias excede um dos três patamares correspondentes, alterando o estado das *flags* associadas. Em seguida, o conjunto de todas as *flags* é comparado com uma tabela lógica de decisão, a qual guarda os padrões verificados para os estados de todas as *flags* para cada tipo de transitório. Quando o conjunto destes parâmetros satisfaz um conjunto de condições, o evento correspondente é então caracterizado. Dessa forma, a classificação final se dá quando os padrões não se alteram por tempo equivalente a um ciclo da frequência fundamental, após a última detecção.

A metodologia foi testada para amostragens de 16, 32, 64 e 96 amostras por ciclo, apresentando excelente capacidade de detecção e classificação para todos os casos analisados, utilizando-se as três primeiras taxas de amostragem. Para 96 amostras por ciclo, essa capacidade foi restringida e não se obteve êxito para todos os casos.

O Capítulo seguinte apresenta os resultados obtidos para a amostragem de 16 amostras por ciclo, evidenciando a robustez da metodologia proposta.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Considerações Gerais

Nesse capítulo, são apresentados os resultados obtidos para os testes envolvendo a metodologia de detecção e classificação de faltas em linhas de transmissão descrita neste trabalho. Para a avaliação do método proposto foi utilizada o *software* EMTP-ATP, de modo a se obter os sinais de corrente e tensão no qual os resultados apresentados foram simulados para 16 amostras por ciclo.

Um sistema teste foi selecionado para discussão dos resultados. As metodologias foram analisadas com precisão na detecção e classificação e também se podem observar as vantagens do método proposto para este trabalho

4.2 Sistema Teste

As metodologias utilizadas para o desenvolvimento do trabalho, foram implementadas no MATLAB®. O sistema teste adotado para as simulações de eventos transitórios é apresentado na Figura 15. A partir destas simulações em EMTP-ATP - *Alternative Transient Program* foram obtidos os sinais de tensão e correntes empregados no estudo.

Para a exploração dos sinais foi utilizado para avaliação a metodologia para detecção e classificação de eventos transitórios, um sistema elétrico de potência uma linha de transmissão de 230 kV com 100 km de extensão, uma frequência de 60 Hz. Os geradores tem seu fluxo de potência da esquerda para a direita, tendo como o segundo gerador diferentes ângulos de defasagem, com condições iniciais variando de 0° , -1° , -30° , 1° , e 30° .

Além disso, todos os casos simulados foram em pontos distintos da linha de transmissão, sendo localizados em 0%, 20%, 50%, 80%, 100% da LT. O tempo total para cada simulação foi de 0,20 segundos, e, na maioria dos casos simulados, a falta teve uma pequena variação de 0,175 à 0,19 s. Alguns parâmetros do sistema utilizado para simulação se analisa na Tabela 7.

Figura – 15 - Sistema teste utilizado para as simulações.

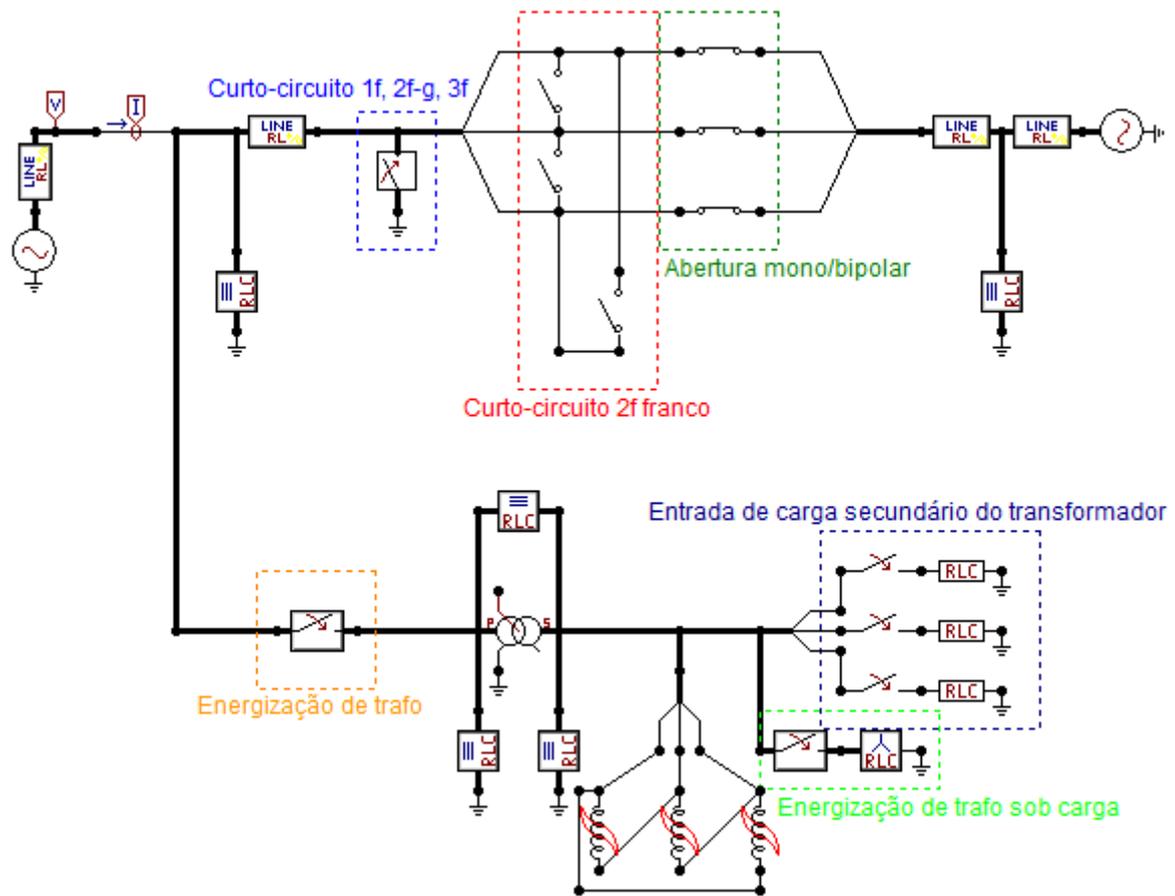


Tabela 7 – Parâmetros do sistema utilizado para simulação.

Parâmetros do Sistema	
Z_{so}	$3,681 + j24,515\Omega$
Z_{S1}	$0,818 + j7,575\Omega$
Z_{LT0}	$0,1942 + j1,2249\Omega/km$
Z_{LT1}	$0,042 + j0,3877\Omega/km$
Va	230 kV
Trafo	$230/13.8\text{ kV}$

A primeira chave auxilia para fazer as simulações de curto-circuito monofásico, bifásico terra e trifásico. Seguindo no mesmo sentido do fluxo, as

próximas chaves servem apenas para o curto-circuito bifásico franco. Do mesmo modo as próximas chaves são analisadas uma abertura monopolar e bipolar no sistema.

Com a abertura da primeira chave, o fluxo não irá mais passar, fazendo com que o fluxo percorra um novo caminho, na qual se deslocará para baixo passando pelo transformador. Ao fechar a chave antes do transformador iremos ter a energização do transformador, mantendo na mesma sequencia fechando a próxima chave e abrindo a anterior nos proporciona a energização do transformador sob carga, de mesmo modo, se for feito o mesmo procedimento com as chaves, a simulação resultara na entrada e saída de carga no secundário do transformador.

4.3 Resultados para Curto-Circuito

4.3.1 Curto-circuito trifásico

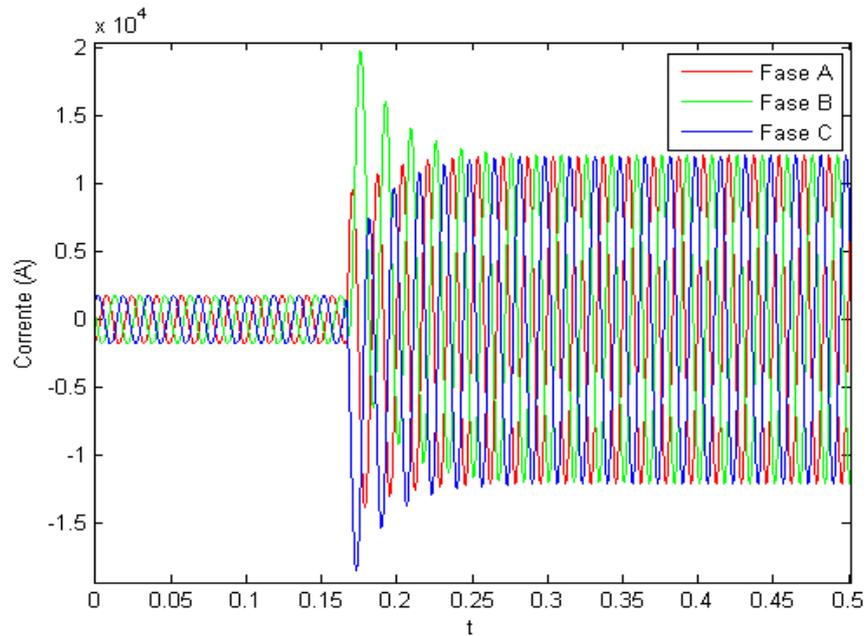
Nas Figuras 16 e 17 estão representados os sinais de corrente e tensão no sistema para simulações na qual ressalta se o curto-circuito trifásico. Durante as condições da falta, as amplitudes das correntes chegam a quase 20 kA, no início da falta em 0,1893 s. Pode-se observar que as envoltórias dos sinais das três fases são alteradas devido à existência da componente DC, a qual varia a amplitude desses sinais até que a falta entre em regime permanente, permanecendo em um valor maior do que o inicial. Além disso, as formas de onda de tensão das três fases sofrem um afundamento após a ocorrência da falta, mantendo amplitudes menores do que aquelas verificadas inicialmente.

Para os demais curtos-circuitos, sendo eles os bifásicos franco, bifásicos terra e os monofásicos, o comportamento analisado na simulação dos eventos transitórios nos sinais de tensão e corrente foram semelhantes quando são observados somente as amplitudes. Todos eles tiveram um desbalanceamento nos sinais de tensão nas fases analisadas no sistema.

Além disso, as fases analisadas nos bifásicos foram entre AB, BC, AC, e para os monofásicos as fases A, B, C. Levando em consideração os diferentes

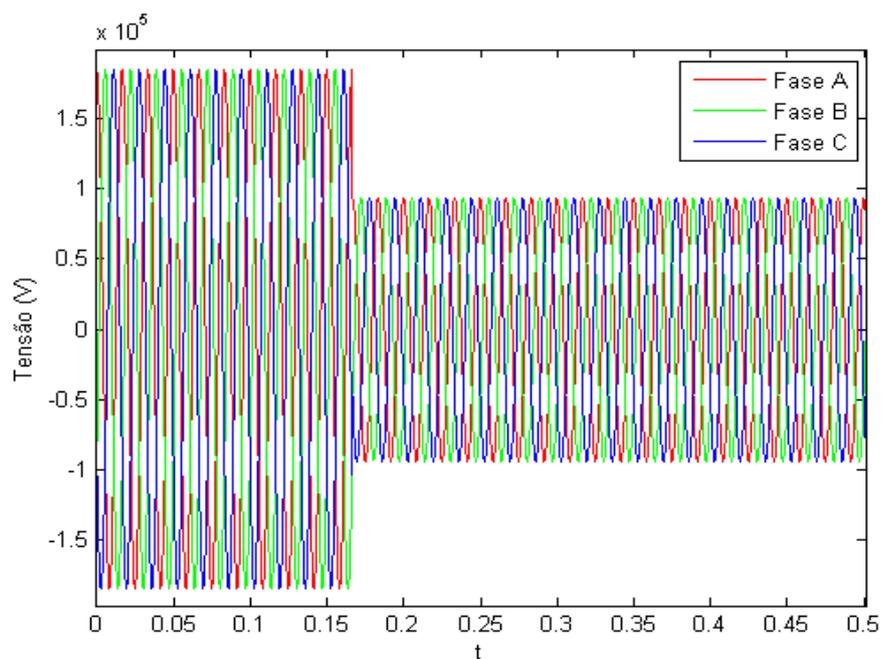
ângulos de carregamento inicial, e também em diferentes pontos da linha de transmissão.

Figura 16 – Sinais de corrente de um curto-circuito trifásico em 20% da linha de transmissão e com ângulo de 30° de carregamento inicial.



Fonte: Elaborado pelo autor.

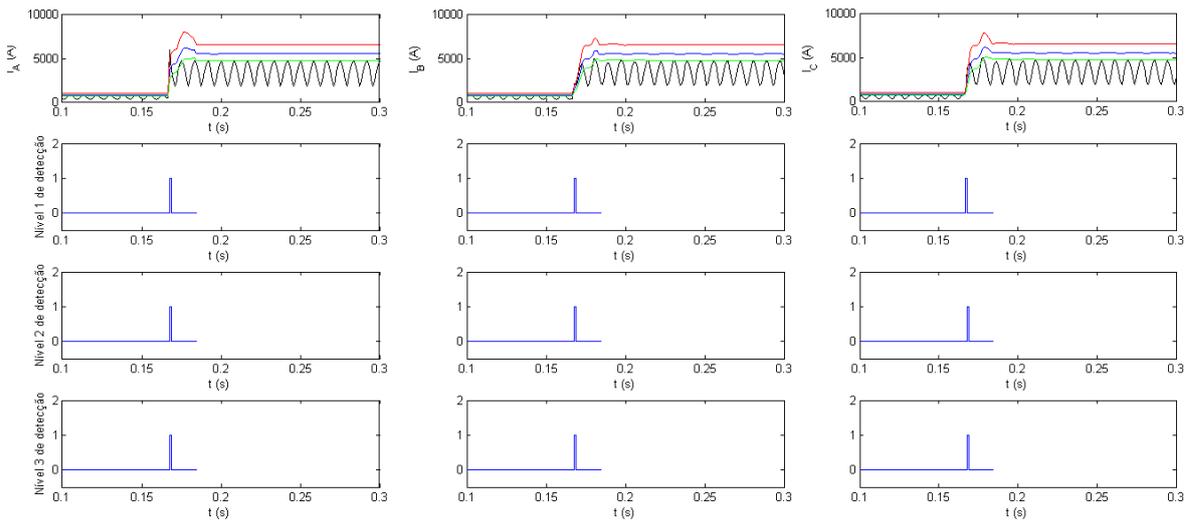
Figura 17 – Sinais de tensão de um curto-circuito trifásico em 20% da linha de transmissão e com ângulo de 30° de carregamento inicial.



Fonte: Elaborado pelo autor.

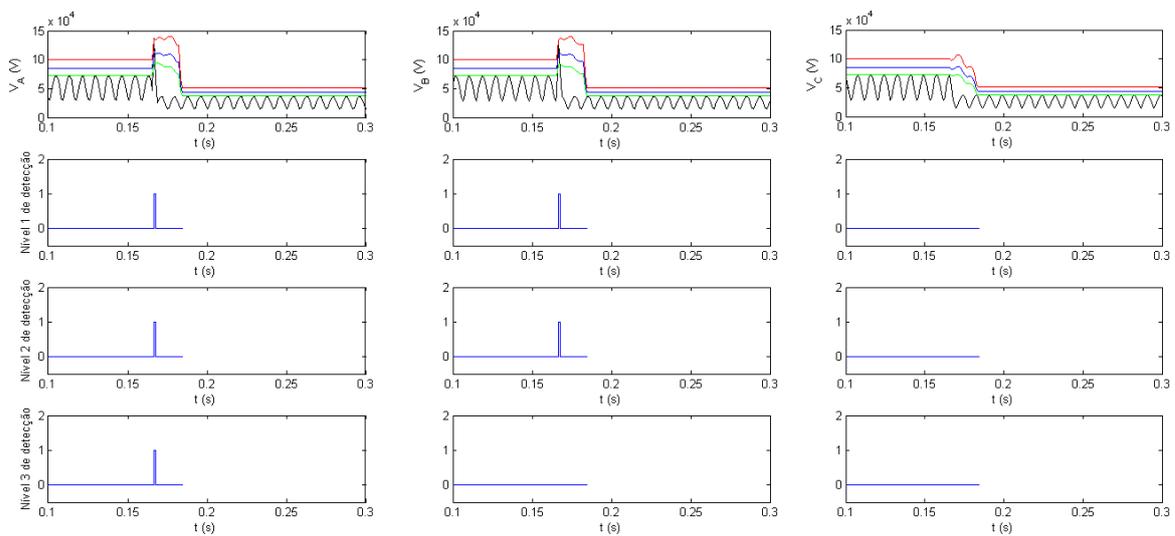
As Figuras 18 e 19 mostram os níveis de detecção ultrapassados pela corrente e tensão.

Figura 18 – Resultados da classificação para corrente de curto-circuito trifásico.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 19 – Resultados da classificação para tensão de curto-circuito trifásico.



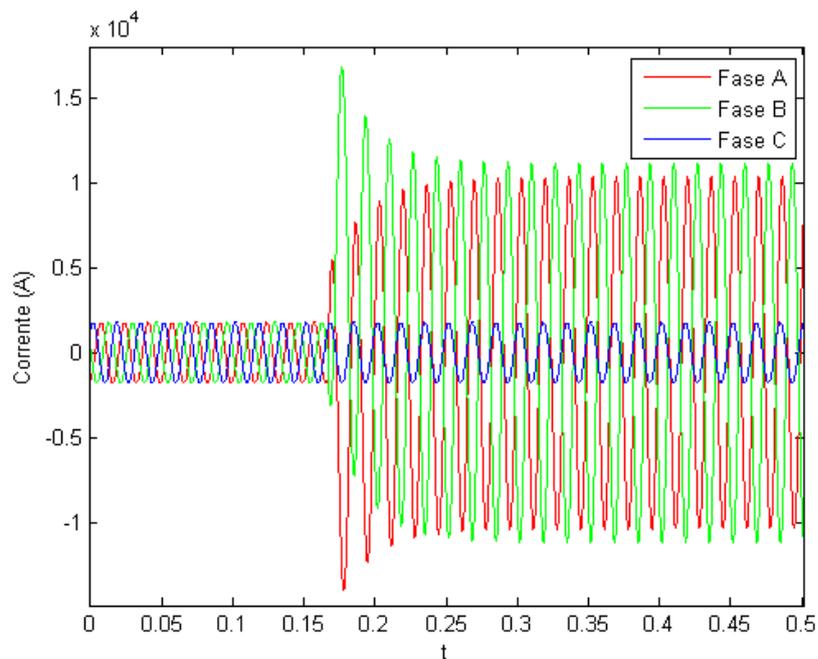
Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3.2 Curto-circuito bifásico

Na Figura 20 e Figura 21 são representados os sinais de corrente e tensão da simulação de um curto-circuito bifásico no sistema que levou um tempo de 0,1756 s para detectar a falta.

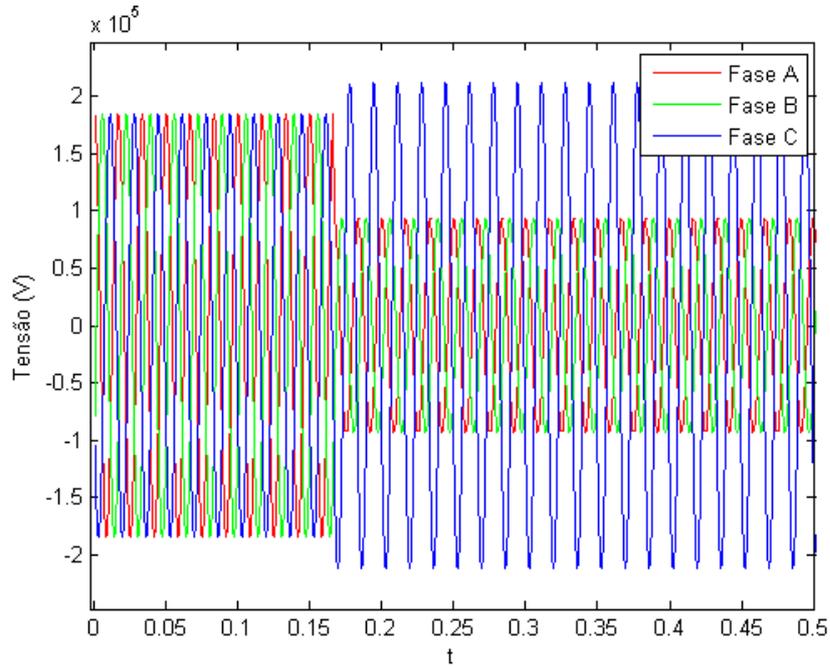
O início do transitório ocorre no mesmo tempo do curto-circuito trifásico, mas agora se observa um alto nível de sobrecorrente que alcançou 21,14 kA, nas fases que foram detectadas. Durante o regime permanente, os sinais de corrente e tensão continuam com o mesmo comportamento.

Figura 20 – Sinais de corrente de um curto-circuito bifásico em 20% da linha de transmissão e com ângulo de 30° de carregamento inicial.



Fonte: Elaborado pelo autor.

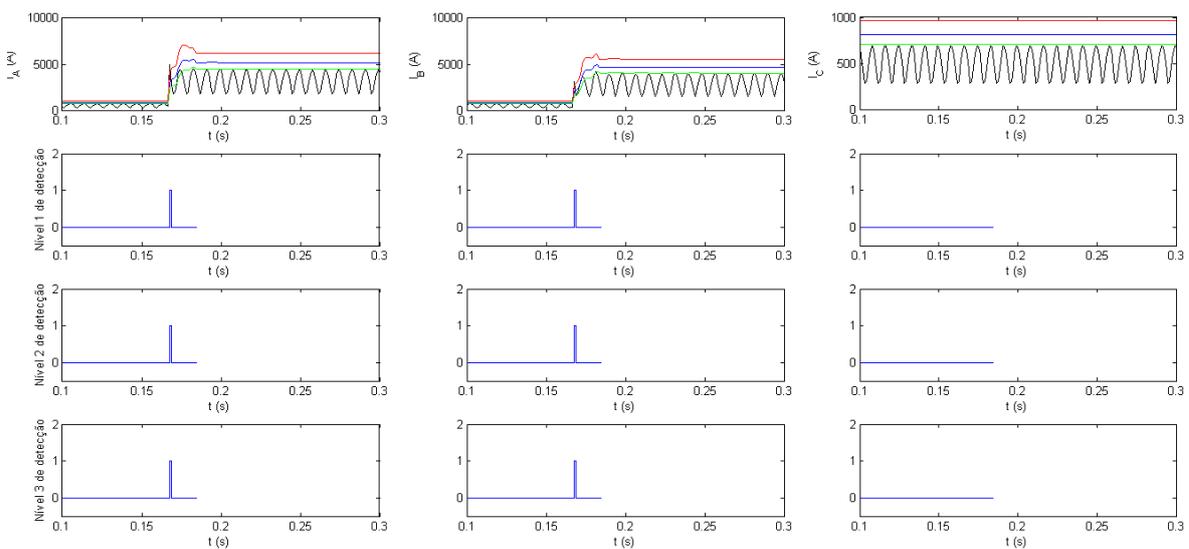
Figura 21 – Sinais de tensão de um curto-circuito bifásico em 20% da linha de transmissão e com ângulo de 30° de carregamento inicial.



Fonte: Elaborado pelo autor.

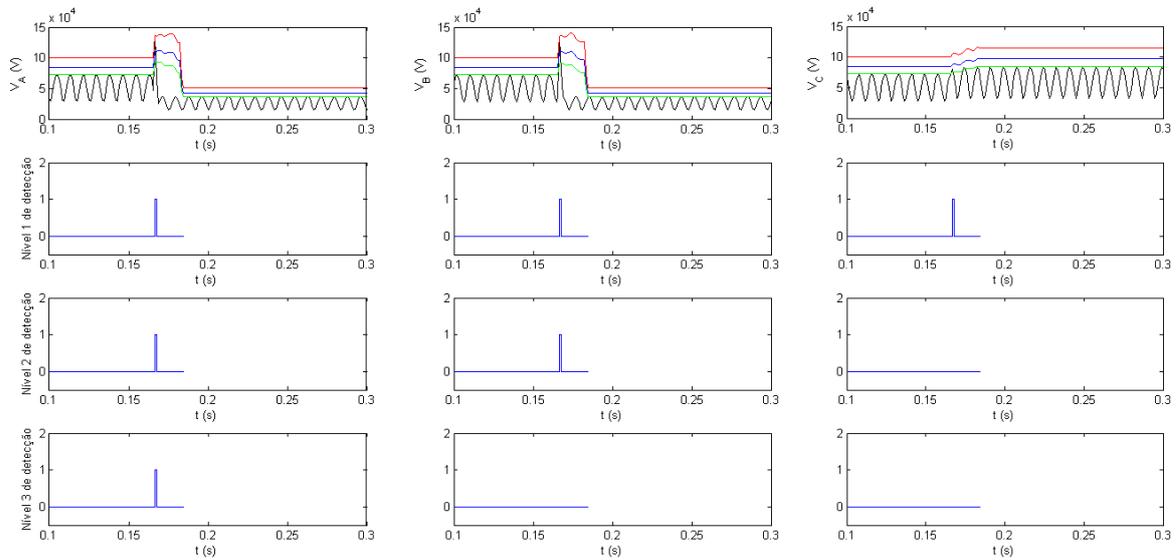
As Figuras 22 e 23 mostram os níveis de detecção ultrapassados pela corrente e tensão.

Figura 22 – Resultados da classificação para corrente de curto-circuito bifásico.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 23 – Resultados da classificação para tensão de curto-circuito bifásico.

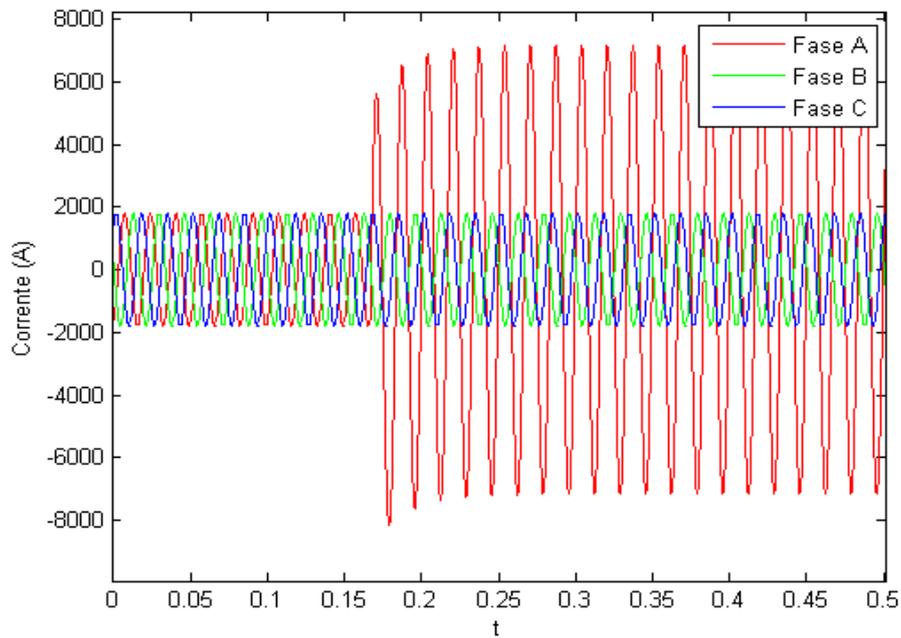


Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3.3 Curto-circuito monofásico

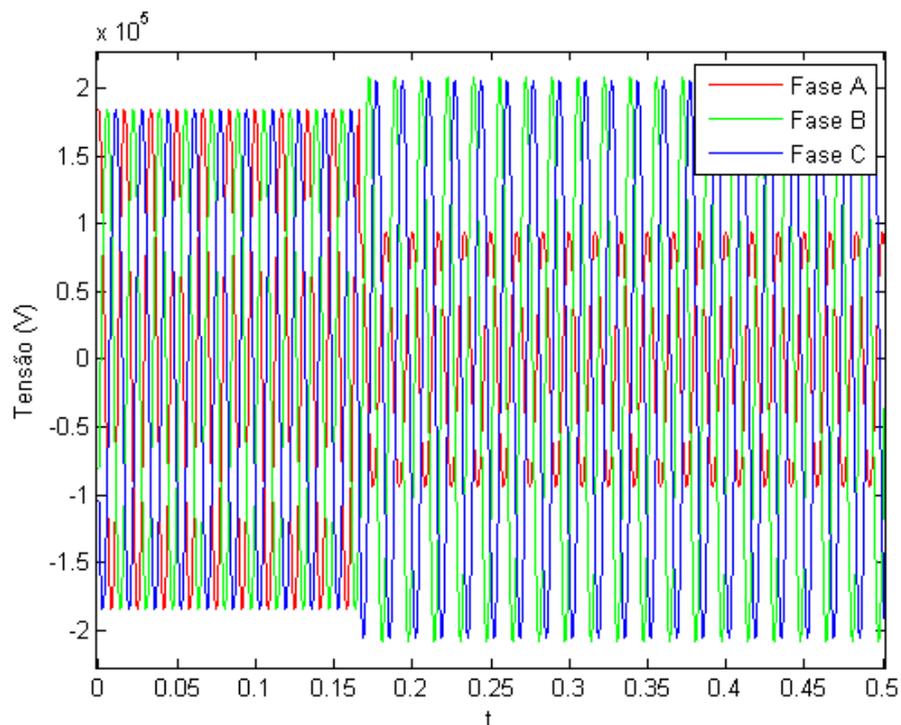
Na Figura 24 e Figura 25 mostra que neste caso foi à fase A que foi simulado, e são representados os sinais de corrente e tensão de um curto-circuito monofásico. Com a diminuição do curto o nível de sobrecorrente também diminui em relação aos outros exemplificados anteriormente, a corrente chegou a 7 kA de pico após o evento transitório. Já o tempo de simulação foi mais rápido que os demais, este caso foi de 0,1698 s.

Figura 24 – Sinais de corrente de um curto-circuito monofásico em 20% da linha de transmissão e com ângulo de 30° de carregamento inicial.



Fonte: Elaborado pelo autor.

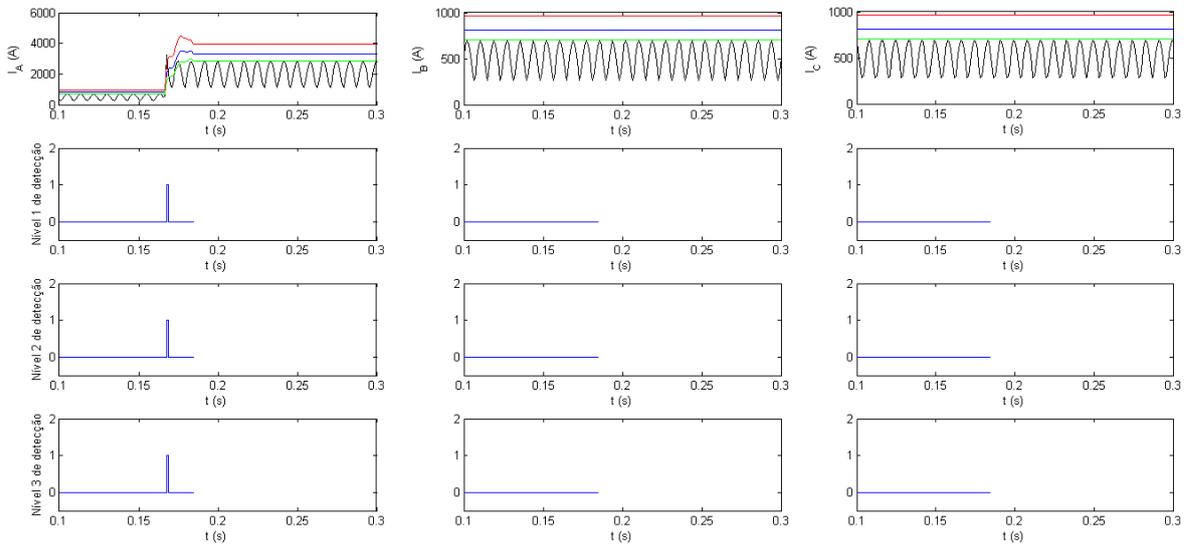
Figura 25 – Sinais de tensão de um curto-circuito monofásico em 20% da linha de transmissão e com ângulo de 30° de carregamento inicial.



Fonte: Elaborado pelo autor.

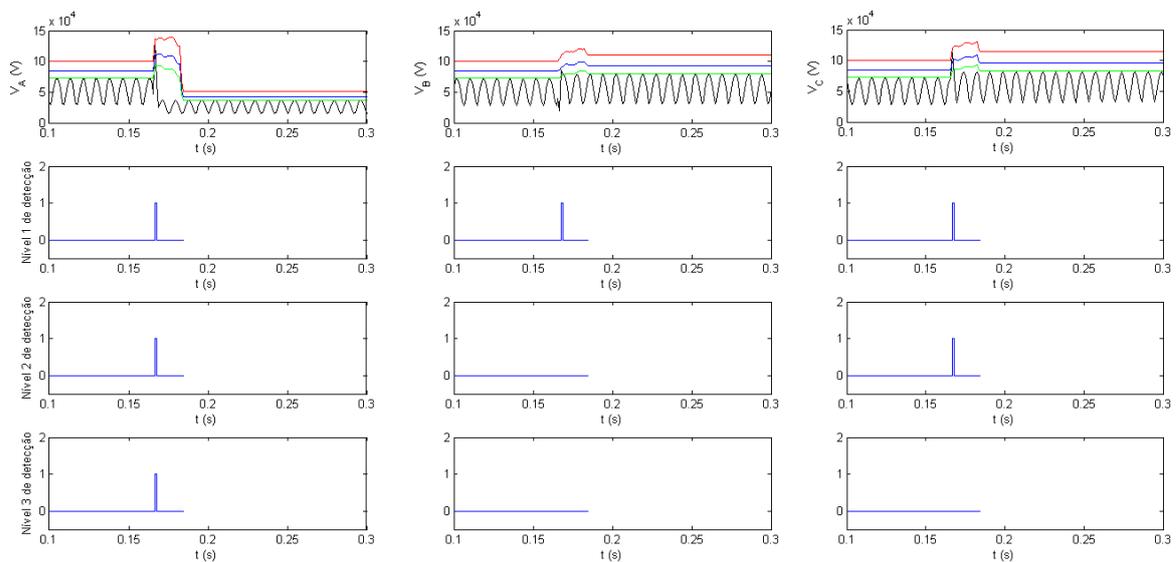
As Figuras 26 e 27 mostram os níveis de detecção ultrapassados pela corrente e tensão.

Figura 26 – Resultados da classificação para corrente de curto-circuito monofásico



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 27 – Resultados da classificação para tensão de curto-circuito monofásico.

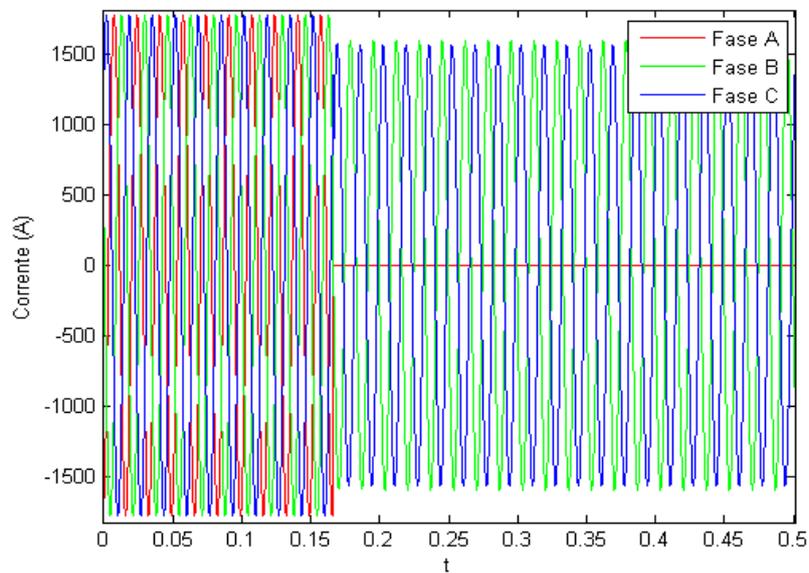


Fonte: Elaborado pelo autor.

4.4 Abertura Monopolar e Bipolar

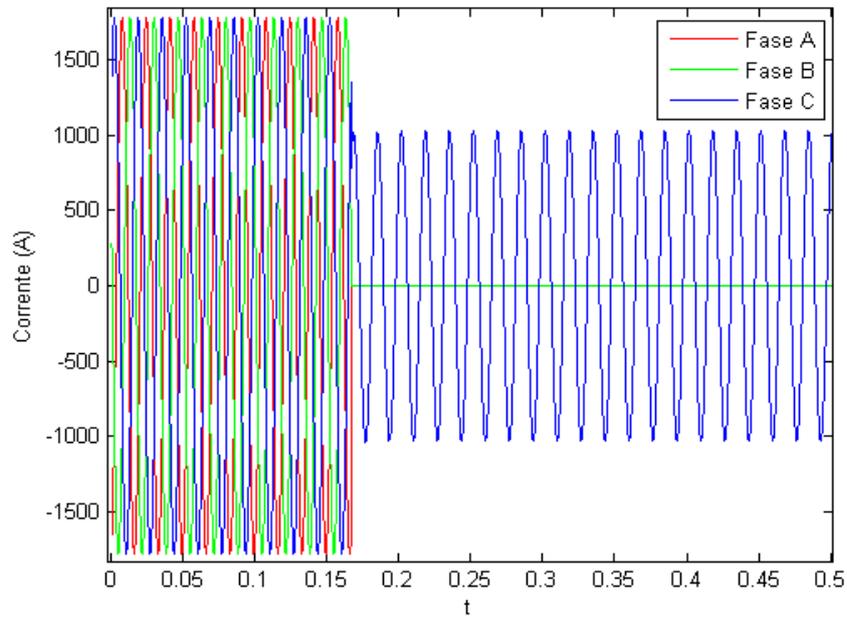
Nas Figuras 28 e 29 mostram as formas de onda os sinais das simulações provenientes de aberturas de chaves no sistema. A partir dos sinais gerados na simulação junto da detecção que mostra os padrões estabelecidos pelas tabelas lógicas na metodologia, pode ser visto na sequência uma nova Tabela 8 que mostra os padrões estabelecidos pela classificação.

Figura 28 – Sinais de corrente da abertura monopolar.



Fonte: Elaborado pelo autor.

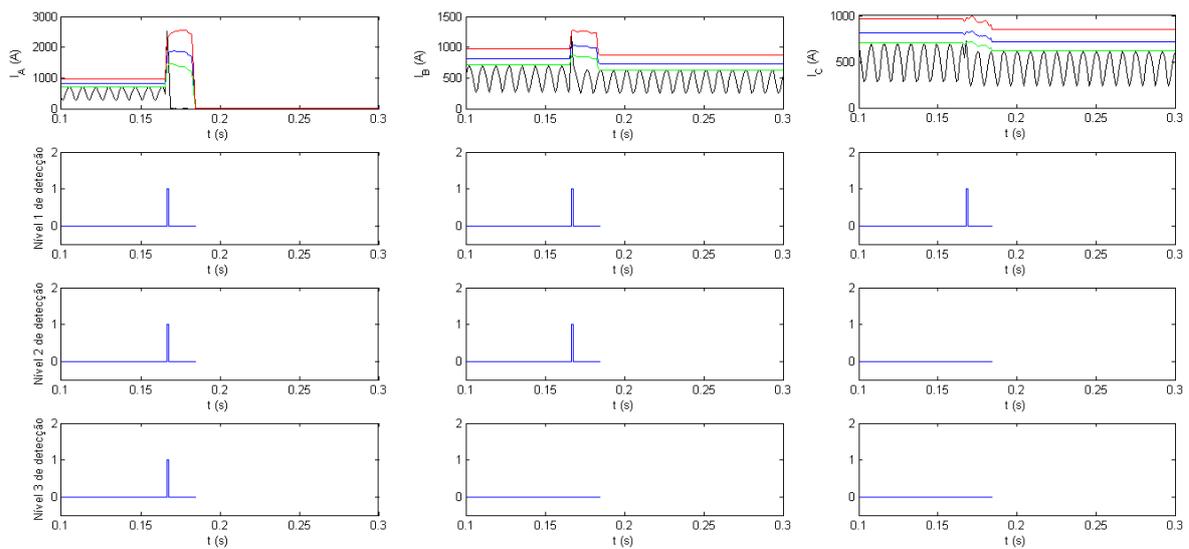
Figura 29 – Sinais de corrente da abertura bipolar.



Fonte: Elaborado pelo autor.

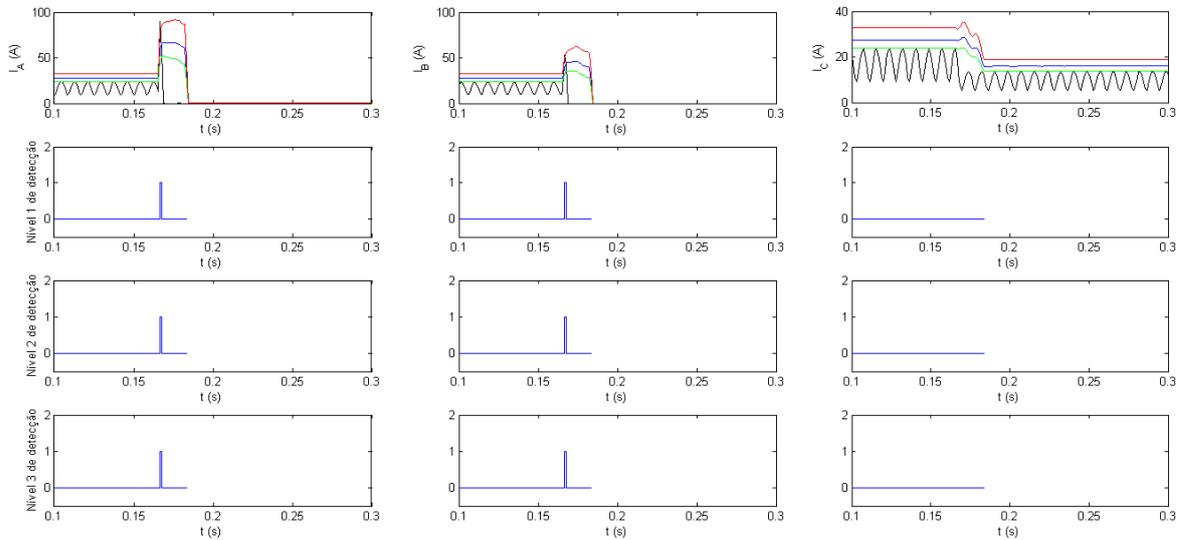
As Figuras 30 e 31 mostram os níveis de detecção ultrapassados pelas correntes.

Figura 30 – Resultados da classificação para corrente de abertura monopolar.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 31 – Resultados da classificação para corrente de abertura bipolar.



Fonte: Elaborado pelo autor.

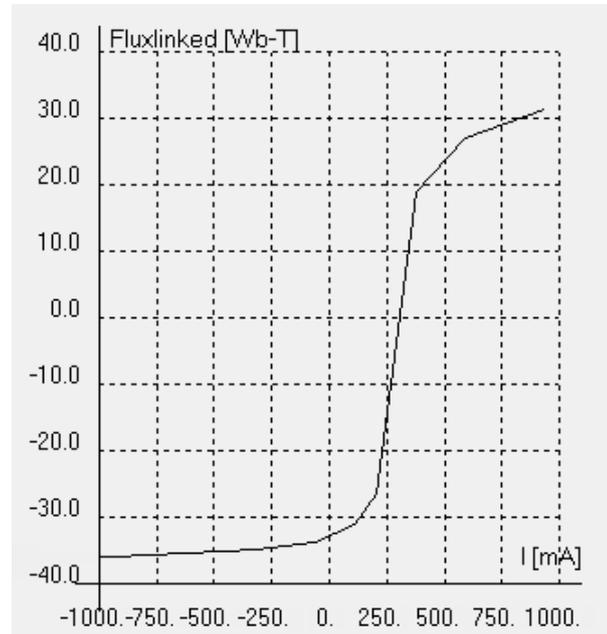
Tabela 8 – Resultados da Classificação para as aberturas.

Evento Simulado	Distância LT	Corrente Máxima	Tempo Classificação
Abertura Monopolar	80%	1710 (A)	0,168 s
Abertura Bipolar	80%	1780 (A)	0,170 s

4.5 Energização de Transformador

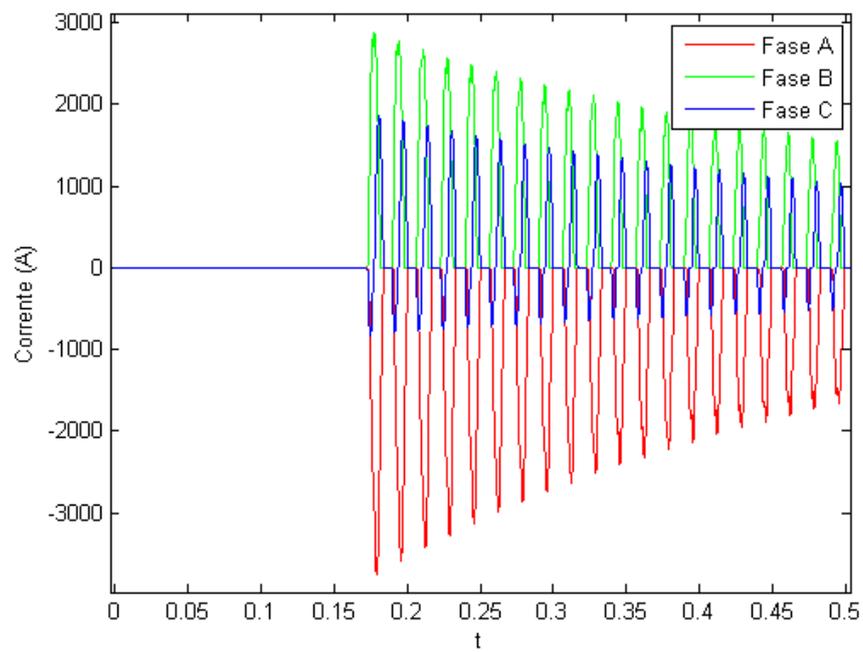
A Figura 32 mostra a curva de histerese obtida depois de atribuir as características no *software* EMTP- ATP, com este auxílio podemos gerar no sistema os sinais da energização de transformador e sob carga como está nas Figuras 33 e 34. E a Tabela 9 está os resultados da classificação depois de estabelecido os parâmetros na detecção.

Figura 32 – Curva de Histerese, software EMTP-ATP.



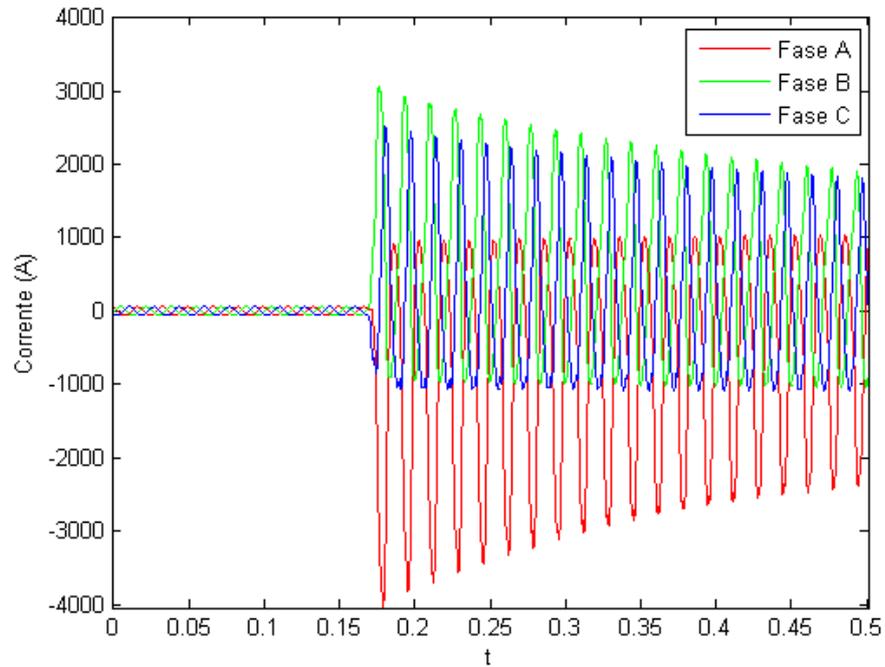
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 33 – Energização do Transformador a vazio



Fonte: Elaborado pelo autor.

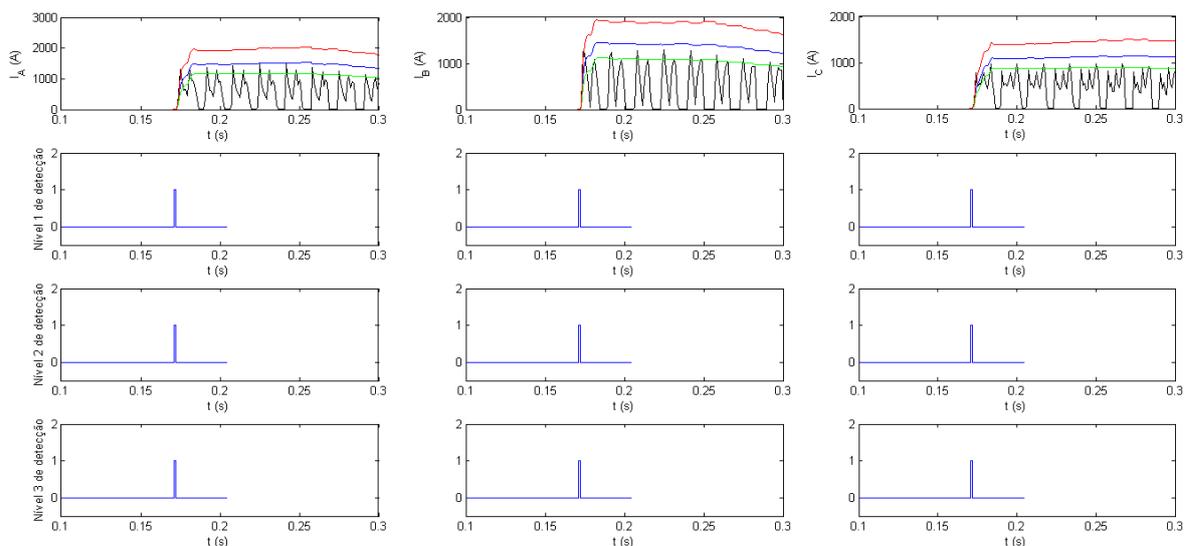
Figura 34 – Energização do Transformador Sob Carga



Fonte: Elaborado pelo autor.

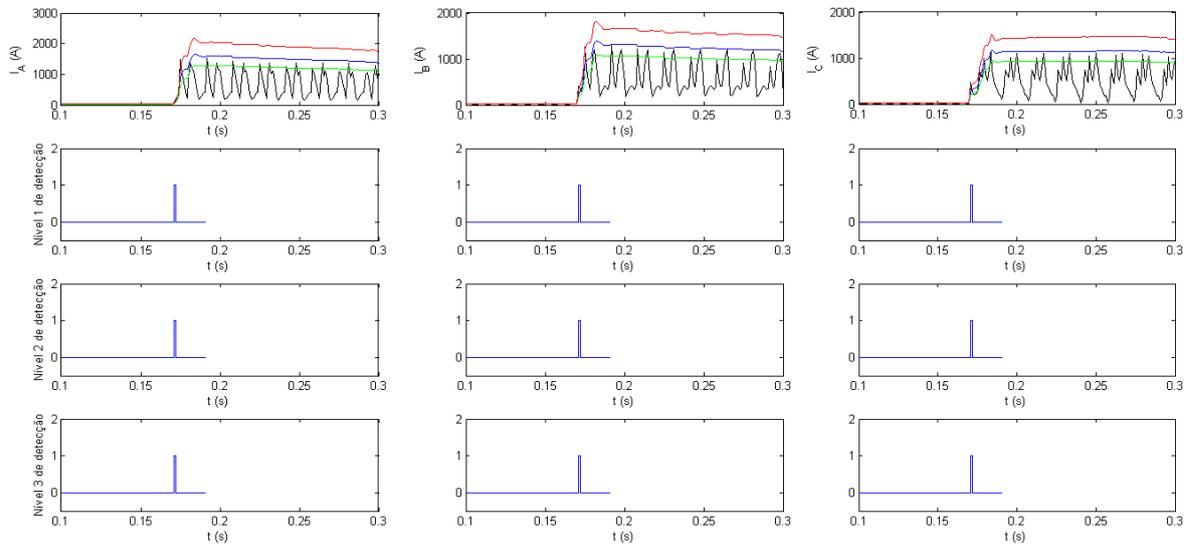
As Figuras 35 e 36 mostram os níveis de detecção ultrapassados pelas correntes.

Figura 35 – Resultados da classificação para corrente de energização do transformador.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 36 – Resultados da classificação para corrente de energização do transformador sob carga.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 9 – Resultados da Classificação para Energização de Transformador.

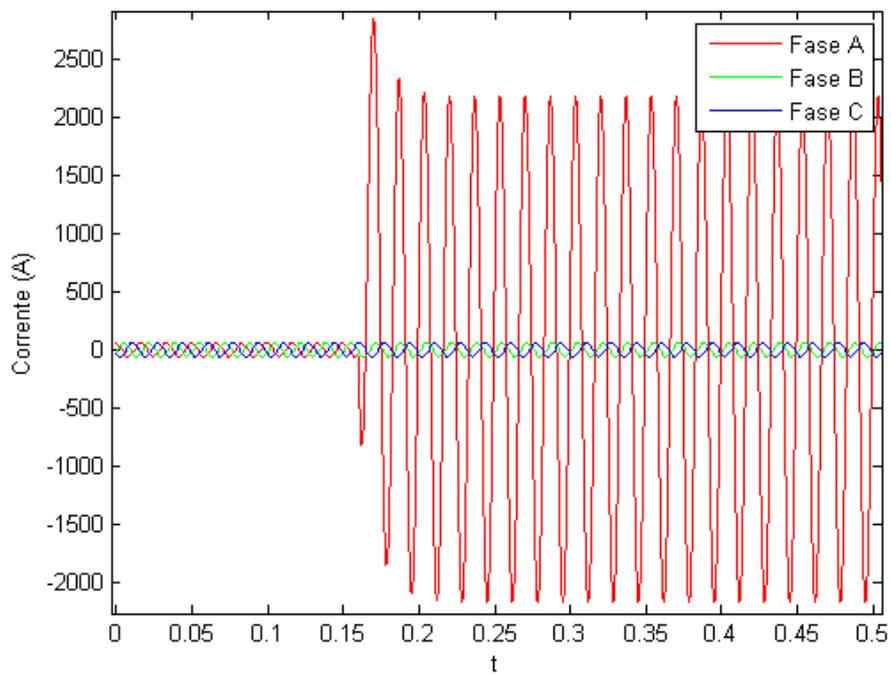
Evento Simulado	Distância LT	Corrente Máxima	Tempo Classificação
Energização Transformador	80%	3780 (A)	0,171 s
Energização Transformador Sob Carga	80%	4000 (A)	0,178 s

4.6 Entrada de carga no secundário do transformador

Nestes eventos transitórios foram simulados para os casos monofásicos, bifásicos e trifásicos, neste caso foram analisados os níveis sendo ultrapassado na detecção nas fases que estavam em carregamento. Com os sinais de corrente a classificação ocorreu normalmente, já para a tensão a classificação foi de suma importância se fez o uso do terceiro nível, para pode diferenciar dos curtos-circuitos,

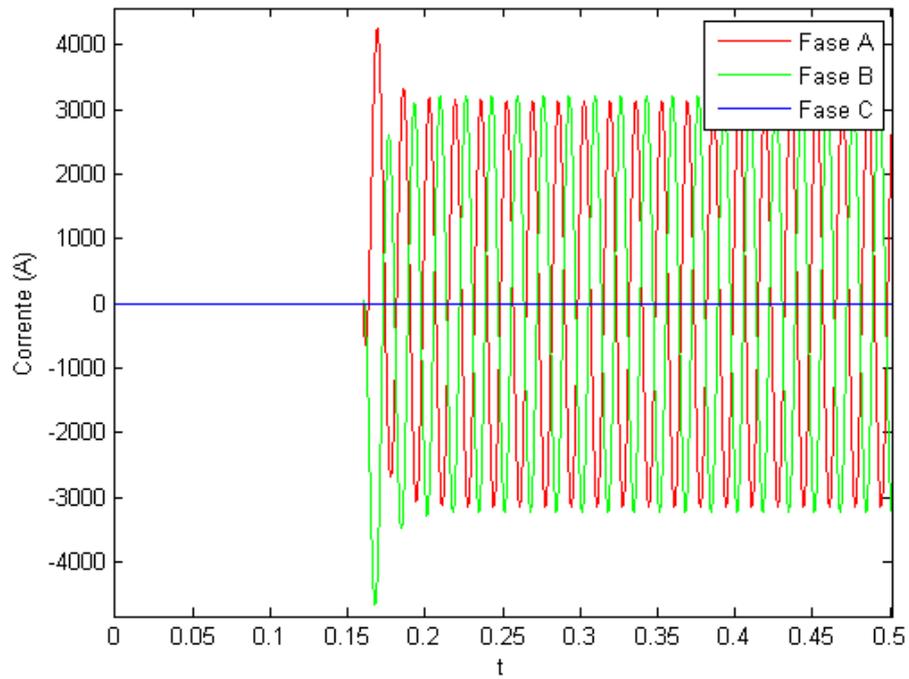
sem ele a lógica ficava rodando e sempre salvando o ultimo evento, como a variação era constante, não chegada à resposta esperada. As Figuras 37, 38 e 39 mostra como fica para cada caso simulado, e na Tabela 10 fica evidente a diferença os parâmetros do resultado da classificação.

Figura 37 – Sinal de corrente da entrada de carga monofásica.



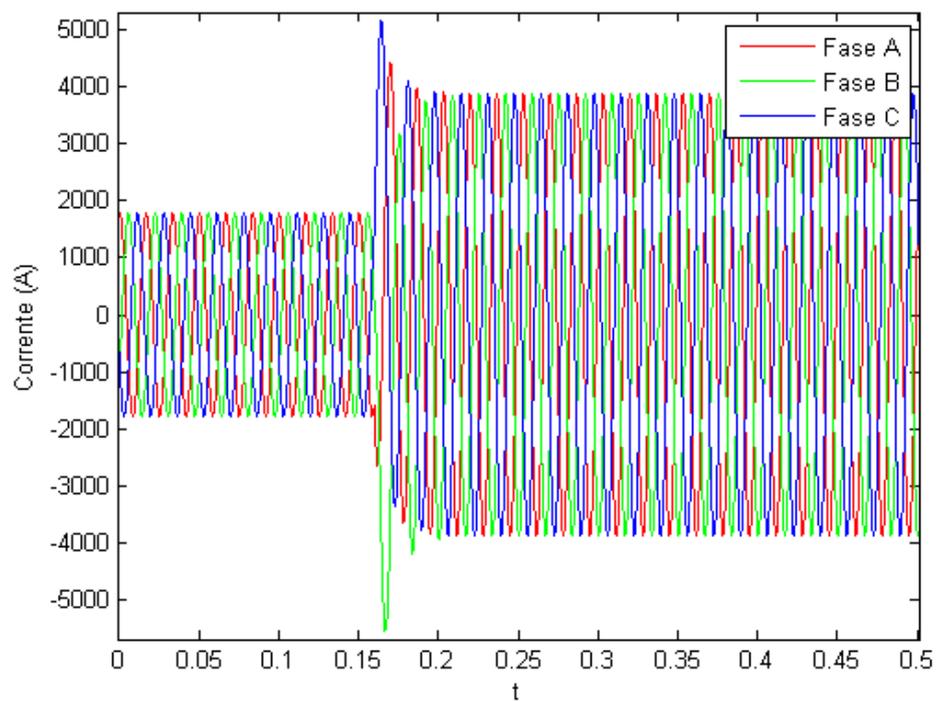
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 38 – Sinal de corrente da entrada de carga bifásica.



Fonte: Elaborado pelo autor.

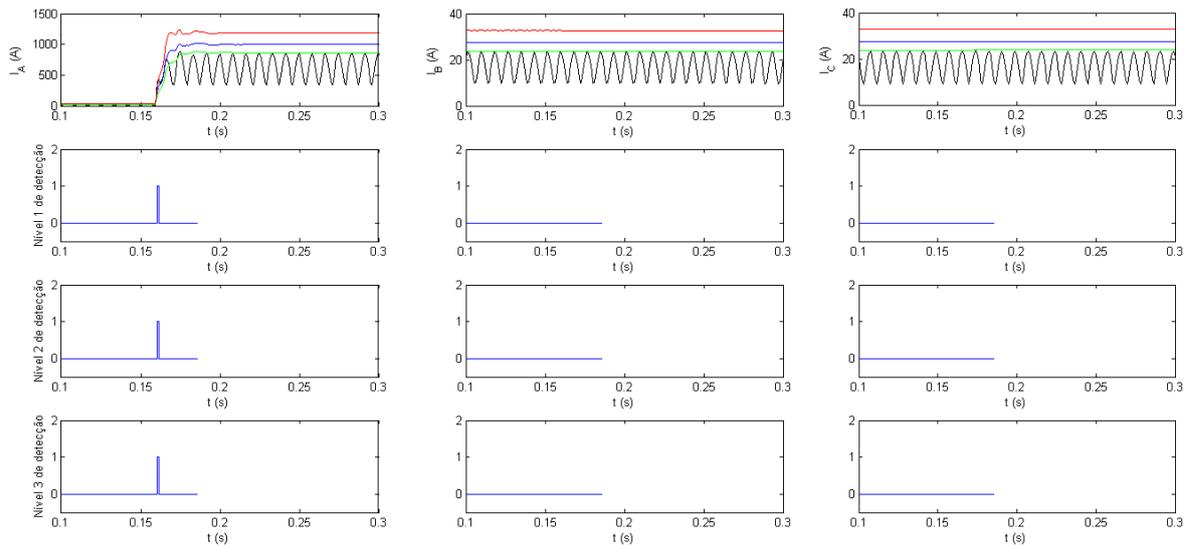
Figura 38 – Sinal de corrente da entrada de carga trifásica.



Fonte: Elaborado pelo autor.

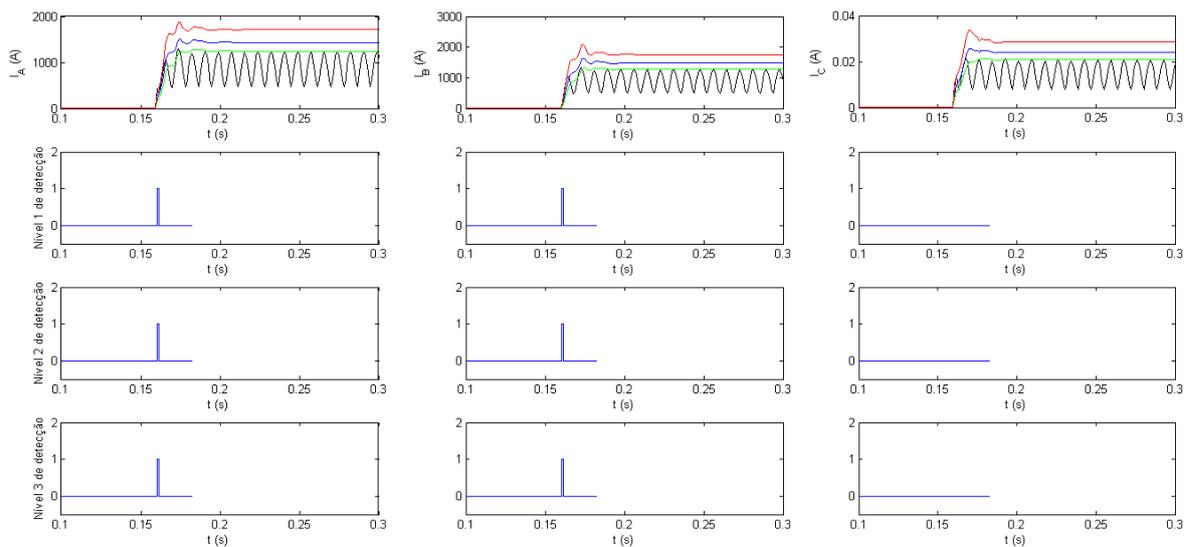
As figuras 40, 41 e 42 mostram os níveis de detecção ultrapassados pelas correntes.

Figura 40 – Resultados da classificação para corrente de entrada de carga monofásica.



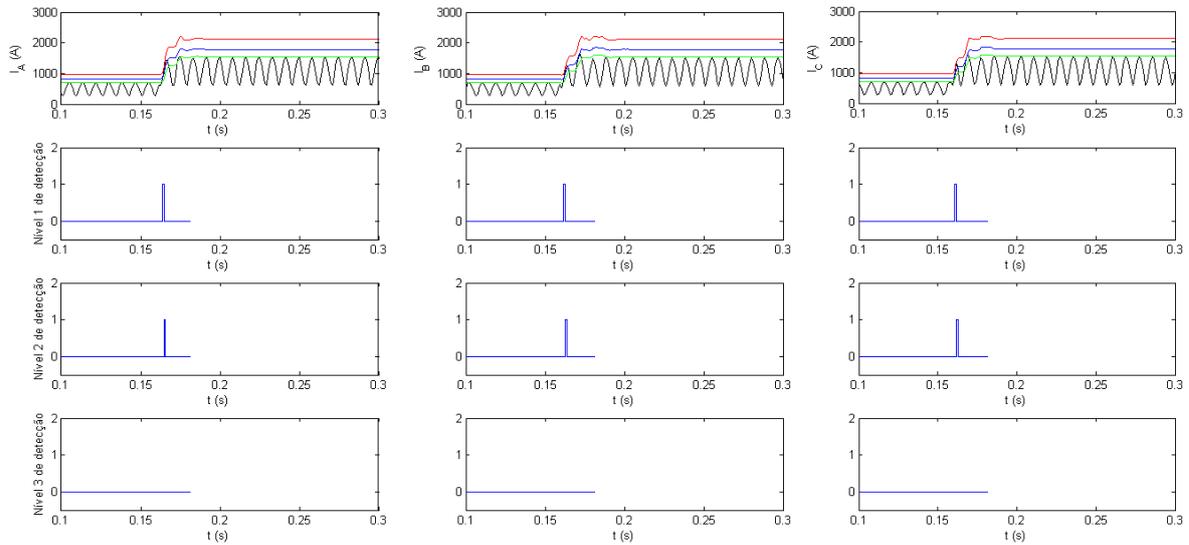
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 41 – Resultados da classificação para corrente de entrada de carga bifásica.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 42 – Resultados da classificação para corrente de entrada de carga trifásica



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 10 – Resultados da Classificação para entrada de carga no secundário do transformador

Evento Simulado	Distância LT	Corrente Máxima	Tempo Classificação
Entrada de carga Monofásica	80%	2670 (A)	0,167 s
Entrada de carga Bifásica	0%	4550 (A)	0,171 s
Entrada de carga Trifásica	50%	5480 (A)	0,179 s

5 CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHO FUTURO

5.1 CONCLUSÃO

O presente trabalho mostra a implementação de uma metodologia destinada a aprimorar a técnica para detecção e classificação de transitórios em sistemas elétricos de potência. Foram simulados diversos eventos transitórios, dentre os principais transitórios a serem classificados pelos relés, destacam-se os curtos-circuitos, entradas de carga, aberturas mono e bipolares e também, a energização de transformadores.

Primeiramente, fez-se necessário o estudo dos fenômenos transitórios, em seguida a criação de um banco de sinais de corrente e tensão, para conhecimento do comportamento das formas de onda para cada evento transitório. Na etapa os resultados apresentados neste trabalho demonstram toda a análise de cada evento, sendo que os sinais de tensão e corrente foram obtidos a partir da simulação de um sistema elétrico de potência no software *Alternative Transients Program* (ATPDraw). Ressalta-se que tais sinais foram gerados a partir da simulação de distúrbios transitórios em uma linha de transmissão de 100km de extensão. Assim, foram apresentadas e discutidas as principais diferenças decorrentes dos diversos tipos de transitórios nas formas de onda desses sinais.

A lógica computacional foi de suma importância do trabalho, a qual classificação dos eventos transitórios foi feita com base da detecção, para cada patamar estabelecido para os sinais de corrente e tensão está associada uma *flag*, a qual foi passada para nível lógico alto, toda vez que o patamar correspondeu ele foi ultrapassado, portanto o evento transitório foi detectado quando o valor das distâncias é alterado assim podem ser estabelecidas as tabelas lógicas padrão, a qual guarda os padrões verificados para os estados de todas as *flags* para o tipo de transitório, com isso o conjunto destes parâmetros satisfaz as condições estabelecidas nas lógicas, portanto se o evento correspondeu às condições, ele é então caracterizado. Dessa forma, a classificação final se estabeleceu quando os padrões não se alteraram por um ciclo, após a última detecção.

Portanto, ressalta-se o tão eficaz que é a metodologia, classificando corretamente 100% dos casos analisados nos resultados. Por fim, além de ser uma

ferramenta de extrema eficácia, os resultados apresentados nesse trabalho foram desenvolvidos de modo a ser mais robusta e eficiente na detecção e classificação de transitórios.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros seguem-se:

- Verificar o desempenho da metodologia frente a condições de saída de carga;
- Analisar o comportamento da metodologia em situações de abertura tripolar no sistema;
- Verificar o desempenho de técnica em condições de descargas atmosféricas;
- Verificar o tempo de atuação da metodologia em relação ao tempo de atuação dos relés de proteção; e
- Implementar outras técnicas para detecção e classificação de transitórios, de modo a efetuar comparação entre desempenhos.

REFERÊNCIAS

- ABOLLAHI, A; SEYEDTABAI, S. **Comparison of fourier & wavelet transform methods for transmission line fault classification**. 4th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO), 2010.
- AL-KHALIFAH, A. K.; EL-SAADANY, E. F. **Investigation of Magnetizing Inrush Current in a Single-Phase Transformer**. In: CONFERENCE ON LARGE ENGINEERING SYSTEMS, 2006.
- ARAUJO, A. E. A; NEVES, W. L. A. **Cálculos de Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Energia**. 1st. ed. Belo Horizonte, Minas Gerais: UFMG, 2005.
- B. RAVINDRANATH REDDY. **Fault Detection, Classification and Location on Transmission Lines Using Wavelet Transform**. Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2009.
- COURY, D. V. **Introdução aos Sistemas Elétricos de Potência**. Disponível em <<http://www.sel.eesc.sc.usp.br/protecao/apostilaprotecaosel183.pdf>>. Acesso em 30 Dezembro 2016, 2002.
- DAS, B; REDDY, J. V. **Fuzzy-logic-based fault classification scheme for digital distance protection**. IEEE Transactions Power Delivery, 2005.
- 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.
- MAAMOON, F. AL.; KABABJIE, AL. **A Fault Detection and Classification using New Distance Relay**. First International Conference on Renewable Energies and Vehicular Technology, 2012.
- EL-SERAFI, A. M.; FARIED, S. O. **Effect of adaptive reclosing on turbine generator shaft torsional torques**. IEEE Transactions on Power Systems, 1994.

FAKHERI, A. J.; et al. The use of reactor switches in single phase switching. CIGRÉ, 1980.

FILHO, J. M.; MAMEDE, D. R., **Proteção de Sistemas Elétricos de Potencia**, 1ª ed., Rio de Janeiro: LTC, 2011.

GAYATHRI, K. & KUMARAPPAN, N. **Comparative Study of Fault Identification and Classification on EHV Lines using Discrete Wavelet Transform and Fourier Transform Based ANN**. International Journal of Electrical, Computer, and Systems Engineering, vol. 2, 2008.

GODA, Y.; et al. **Forced extinction characteristics of secondary arc on UHV transmission lines**. IEEE Transactions on Power Delivery, July 1993.

GOMES. A. DE SOUZA. **Detecção e Classificação de Falhas em Linhas de Transmissão Utilizando Análise Funcional e Inteligência Computacional**. Dissertação de Mestrado | Universidade Federal de Minas Gerais, 2011.

INACIO, M. J., MAIA, R. D., Lemos, A. P. e Caminhas, W. M. **Aprendizado Participativo Aplicado à Detecção e Diagnóstico On-Line da Falhas em Sistemas Dinâmicos**. In: IX Congresso Brasileiro de Redes Neurais / Inteligência Computacional, 2009.

K. M. SILVA, B. A. SOUZA e N. S. D. Brito **Fault Detection and Classification in Transmission Lines Based on Wavelet Transform and ANN**. VOL. 21, NO. 4, OCTOBER 2006.

KIM, CHUL-HWAN et al. **A Novel Fault-Detection Technique of High-Impedance Arcing Faults in Transmission Lines using the Wavelet Transform**. IEEE Transaction on Power Delivery, vol. 17, 2002.

LING, F.; ZHENGYOU, H. & ZHIQIAN, B. **Novel approach to fault classification in EHV transmission line based on multi-information measurements of fault transients**. In Power and Energy Engineering Conference, 2009.

NEVES, W.L.A.; DOMMEL, H.W. **On Modelling Iron Core Nonlinearities**. In: IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS. Volume: 8, issue: 2, 1993.

REDDY, M. JAYABHARATA e MOHANTA, D. K. **A Wavelet-Fuzzy Combined Approach for Classification and Location of Transmission Line Faults**. International Journal of Electric Power & Energy Systems, 2007.

SHPERLING, B. R.; et al. **Compensation scheme for single pole switching on untransposed transmission lines**, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, v. PAS-97.

SLUIS, L. van der. **Transients in Power Systems**. 1st. ed. Arnhem, Netherlands: John Wiley & Sons, 2001.

VANAMADEVI, N; ARIVAMUDHAN, M; SANTHI, S. **Detection and Classification of Impulse faults in transformer using Wavelet Transform and Artificial Neural Network**. Department of Instrumentation Engineering. India. ICSET 2008.

VASQUEZ, ERNESTO; ALTURE, HECTOR J. E CHACON, OSCAR L. **Neural Network Approach To Fault Detection In Electric Power Systems**. IEEE International Conference on Neural Networks, vol. 4, 1996.

WEBSPER, S. P.; et al. **Investigation into breaker reclosure strategy for adaptive single pole autoreclosing**. IEEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, Nov. 1995.

ZACHARIAS, E; MICHALIS, E; ZERVAKIS, **“Detection and Classification of Winding Faults in Windmill Generators Using Wavelet Transform and ANN”**, member IEEE, and George Stavrakakis. Meas. Sci. Technol. 2004.

$\max(\text{flagAi1})=0 \ \& \ \max(\text{flagAi2})=0 \ \& \ \max(\text{flagAi3})=0 \ \& \dots$
 $\max(\text{flagBi1})=0 \ \& \ \max(\text{flagBi2})=0 \ \& \ \max(\text{flagBi3})=0 \ \& \dots$
 $\max(\text{flagCi1})=1 \ \& \ \max(\text{flagCi2})=1 \ \& \ \max(\text{flagCi3})=1 \ \& \dots$
 $(\max(\text{flagAv1})=0 \ \text{ou} \ \max(\text{flagAv1})=1) \ \& \dots$
 $(\max(\text{flagAv2})=0 \ \text{ou} \ \max(\text{flagAv2})=1) \ \& \dots$
 $(\max(\text{flagAv3})=0 \ \text{ou} \ \max(\text{flagAv3})=1) \ \& \dots$
 $(\max(\text{flagBv1})=0 \ \text{ou} \ \max(\text{flagBv1})=1) \ \& \dots$
 $(\max(\text{flagBv2})=0 \ \text{ou} \ \max(\text{flagBv2})=1) \ \& \dots$
 $(\max(\text{flagBv3})=0 \ \text{ou} \ \max(\text{flagBv3})=1) \ \& \dots$
 $(\max(\text{flagCv1})=0 \ \text{ou} \ \max(\text{flagCv1})=1) \ \& \dots$
 $(\max(\text{flagCv2})=0 \ \text{ou} \ \max(\text{flagCv2})=1) \ \& \dots$
 $(\max(\text{flagCv3})=0 \ \text{ou} \ \max(\text{flagCv3})=1) \ \& \dots$
 $(\text{flagIA}=1 \ \text{ou} \ \text{flagIA}=0) \ \& \ (\text{flagIB}=1 \ \text{ou} \ \text{flagIB}=0) \ \& \dots$
 $(\text{flagIC}=1 \ \text{ou} \ \text{flagIC}=0)$

Condição do curto-circuito monofásico fase C (a.7)

$(\max(\text{flagAi1})=1 \ \text{ou} \ \max(\text{flagAi1})=0) \ \& \dots$
 $(\max(\text{flagAi2})=1 \ \text{ou} \ \max(\text{flagAi2})=0) \ \& \dots$
 $(\max(\text{flagAi3})=1 \ \text{ou} \ \max(\text{flagAi3})=0) \ \& \dots$
 $(\max(\text{flagBi1})=1 \ \text{ou} \ \max(\text{flagBi1})=0) \ \& \dots$
 $(\max(\text{flagBi2})=1 \ \text{ou} \ \max(\text{flagBi2})=0) \ \& \dots$
 $(\max(\text{flagBi3})=1 \ \text{ou} \ \max(\text{flagBi3})=0) \ \& \dots$
 $\max(\text{flagCi2})=0 \ \& \ (\max(\text{flagCi1})=1 \ \text{ou} \ \max(\text{flagCi1})=0) \ \& \ \max(\text{flagCi3})=0 \ \& \dots$
 $(\max(\text{flagAv1})=1 \ \text{ou} \ \max(\text{flagAv1})=0) \ \& \dots$
 $(\max(\text{flagAv2})=1 \ \text{ou} \ \max(\text{flagAv2})=0) \ \& \dots$
 $(\max(\text{flagAv3})=1 \ \text{ou} \ \max(\text{flagAv3})=0) \ \& \dots$
 $\max(\text{flagBv1})=0 \ \& \ \max(\text{flagBv2})=0 \ \& \ \max(\text{flagBv3})=0 \ \& \dots$
 $\max(\text{flagCv1})=0 \ \& \ \max(\text{flagCv2})=0 \ \& \ \max(\text{flagCv3})=0 \ \& \dots$
 $\text{flagIA}=0 \ \& \ \text{flagIB}=1 \ \& \ \text{flagIC}=1$

Condição da abertura monopolar fase A (a.8)

$\max(\text{flagAi2})=0 \ \& \ (\max(\text{flagAi1})=1 \ \text{ou} \ \max(\text{flagAi1})=0) \ \& \ \max(\text{flagAi3})=0 \ \& \dots$
 $(\max(\text{flagBi1})=0 \ \text{ou} \ \max(\text{flagBi1})=1) \ \& \dots$
 $(\max(\text{flagBi2})=0 \ \text{ou} \ \max(\text{flagBi2})=1) \ \& \dots$
 $(\max(\text{flagBi3})=0 \ \text{ou} \ \max(\text{flagBi3})=1) \ \& \dots$
 $(\max(\text{flagCi1})=0 \ \text{ou} \ \max(\text{flagCi1})=1) \ \& \dots$
 $(\max(\text{flagCi2})=0 \ \text{ou} \ \max(\text{flagCi2})=1) \ \& \dots$
 $(\max(\text{flagCi3})=1 \ \text{ou} \ \max(\text{flagCi3})=0) \ \& \dots$
 $\max(\text{flagAv1})=0 \ \& \ \max(\text{flagAv2})=0 \ \& \ \max(\text{flagAv3})=0 \ \& \dots$
 $(\max(\text{flagBv1})=0 \ \text{ou} \ \max(\text{flagBv1})=1) \ \& \dots$
 $(\max(\text{flagBv2})=0 \ \text{ou} \ \max(\text{flagBv2})=1) \ \& \dots$
 $(\max(\text{flagBv3})=1 \ \text{ou} \ \max(\text{flagBv3})=0) \ \& \dots$
 $\max(\text{flagCv1})=0 \ \& \ \max(\text{flagCv2})=0 \ \& \ \max(\text{flagCv3})=0 \ \& \dots$
 $\text{flagIA}=1 \ \& \ \text{flagIB}=0 \ \& \ \text{flagIC}=1$

Condição da abertura monopolar fase B (a.9)

$(\max(\text{flagAi1})=0 \text{ ou } \max(\text{flagAi1})=1) \&\dots$
 $(\max(\text{flagAi2})=0 \text{ ou } \max(\text{flagAi2})=1) \&\dots$
 $(\max(\text{flagAi3})=0 \text{ ou } \max(\text{flagAi3})=1) \&\dots$
 $\max(\text{flagBi2})=0 \& (\max(\text{flagBi1})=1 \text{ ou } \max(\text{flagBi1})=0) \& \max(\text{flagBi3})=0 \&\dots$
 $(\max(\text{flagCi1})=0 \text{ ou } \max(\text{flagCi1})=1) \&\dots$
 $(\max(\text{flagCi2})=0 \text{ ou } \max(\text{flagCi2})=1) \&\dots$
 $(\max(\text{flagCi3})=0 \text{ ou } \max(\text{flagCi3})=1) \&\dots$
 $\max(\text{flagAv2})=0 \& \max(\text{flagAv1})=0 \& \max(\text{flagAv3})=0 \&\dots$
 $\max(\text{flagBv2})=0 \& \max(\text{flagBv1})=0 \& \max(\text{flagBv3})=0 \&\dots$
 $(\max(\text{flagCv1})=0 \text{ ou } \max(\text{flagCv1})=1) \&\dots$
 $(\max(\text{flagCv2})=0 \text{ ou } \max(\text{flagCv2})=1) \&\dots$
 $(\max(\text{flagCv3})=0 \text{ ou } \max(\text{flagCv3})=1) \&\dots$
 $\text{flagIA}=1 \& \text{flagIB}=1 \& \text{flagIC}=0$
 Condição da abertura monopolar fase C (a.10)

$\max(\text{flagAv1})=1 \& \max(\text{flagAv2})=1 \& \max(\text{flagAv3})=1 \&\dots$
 $\max(\text{flagBv1})=1 \& \max(\text{flagBv2})=1 \& (\max(\text{flagBv3})=1 \text{ ou } \max(\text{flagBv3})=0) \&\dots$
 $(\max(\text{flagCv1})=0 \text{ ou } \max(\text{flagCv1})=1) \&\dots$
 $(\max(\text{flagCv2})=0 \text{ ou } \max(\text{flagCv2})=1) \&\dots$
 $(\max(\text{flagCv3})=0 \text{ ou } \max(\text{flagCv3})=1) \&\dots$
 $\max(\text{flagAi1})=1 \& \max(\text{flagAi2})=1 \& \max(\text{flagAi3})=1 \&\dots$
 $\max(\text{flagBi1})=1 \& \max(\text{flagBi2})=1 \& \max(\text{flagBi3})=1 \&\dots$
 $(\max(\text{flagCi1})=0 \text{ ou } \max(\text{flagCi1})=1) \&\dots$
 $(\max(\text{flagCi2})=0 \text{ ou } \max(\text{flagCi2})=1) \&\dots$
 $(\max(\text{flagCi3})=0 \text{ ou } \max(\text{flagCi3})=1) \&\dots$
 $\max(\text{flagIA})=0 \& \max(\text{flagIB})=0 \&\dots$
 $(\max(\text{flagIC})=1 \text{ ou } \max(\text{flagIC})=0)$
 Condição da abertura bipolar fase AB (a.11)

$(\max(\text{flagAv1})=1 \text{ ou } \max(\text{flagAv1})=0) \& \max(\text{flagAv2})=0 \& \max(\text{flagAv3})=0 \&\dots$
 $\max(\text{flagBv1})=1 \& \max(\text{flagBv2})=1 \& \max(\text{flagBv3})=1 \&\dots$
 $\max(\text{flagCv1})=1 \& \max(\text{flagCv2})=1 \& \max(\text{flagCv3})=1 \&\dots$
 $(\max(\text{flagAi1})=1 \text{ ou } \max(\text{flagAi1})=0) \&\dots$
 $(\max(\text{flagAi2})=1 \text{ ou } \max(\text{flagAi2})=0) \&$
 $\max(\text{flagAi3})=0 \&\dots$
 $\max(\text{flagBi1})=1 \& \max(\text{flagBi2})=1 \& \max(\text{flagBi3})=1 \&\dots$
 $\max(\text{flagCi1})=1 \& \max(\text{flagCi2})=1 \& \max(\text{flagCi3})=1 \&\dots$
 $\text{flagIC}=0 \& \text{flagIB}=0 \&\& (\text{flagIA}=1 \text{ ou } \text{flagIA}=0)$
 Condição da abertura bipolar fase BC (a.12)

$\max(\text{flagAv1})=1 \& \max(\text{flagAv2})=1 \& \max(\text{flagAv3})=1 \&\dots$
 $\max(\text{flagBv1})=0 \& \max(\text{flagBv2})=0 \& \max(\text{flagBv3})=0 \&\dots$
 $\max(\text{flagCv1})=1 \& \max(\text{flagCv2})=1 \&\& \max(\text{flagCv3})=1 \&\dots$
 $\max(\text{flagAi1})=1 \& \max(\text{flagAi2})=1 \& (\max(\text{flagAi3})=1 \text{ ou } \max(\text{flagAi3})=0) \&\&\dots$
 $(\max(\text{flagBi1})=0 \text{ ou } \max(\text{flagBi1})=1) \&\dots$
 $(\max(\text{flagBi2})=0 \text{ ou } \max(\text{flagBi2})=1) \&\dots$
 $(\max(\text{flagBi3})=0 \text{ ou } \max(\text{flagBi3})=1) \&\dots$
 $\max(\text{flagCi2})=1 \& \max(\text{flagCi1})=1 \& \max(\text{flagCi3})=1 \&\dots$
 $\text{flagIA}=0 \&\& \text{flagIC}=0 \& (\text{flagIB}=1 \text{ ou } \text{flagIB}=0)$
 Condição da abertura bipolar fase AC (a.13)

