

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº 1022

**CARACTERIZAÇÃO DE PERÍODOS RELATIVOS A EVENTOS DE
CURTO-CIRCUITO EM LINHAS DE TRANSMISSÃO**

Geraldo Rodrigues Silveira Neto

DATA DA DEFESA: 12/12/2017

Universidade Federal de Minas Gerais

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

**CARACTERIZAÇÃO DE PERÍODOS RELATIVOS A EVENTOS
DE CURTO-CIRCUITO EM LINHAS DE TRANSMISSÃO**

Geraldo Rodrigues Silveira Neto

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Clever Sebastião Pereira Filho

Belo Horizonte - MG

Dezembro de 2017

S587c

Silveira Neto, Geraldo Rodrigues.

Caracterização de períodos relativos a eventos de curto-circuito em linhas de transmissão [manuscrito] / Geraldo Rodrigues Silveira Neto. - 2017.

97 f., enc.: il.

Orientador: Clever Sebastião Pereira Filho.

Dissertação (mestrado) Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Bibliografia: f. 96-97.

1. Engenharia elétrica - Teses. 2. Sistemas elétricos de potência - Teses. 3. Linhas elétricas - Teses. I. Pereira Filho, Clever Sebastião. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 621.3(043)


**"Caracterização de Períodos Relativos a Eventos
de Curto-circuito em Linhas de Transmissão"**

Geraldo Rodrigues Silveira Neto

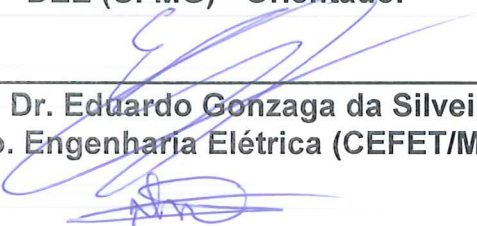
Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 12 de dezembro de 2017.

Por:




Prof. Dr. Clever Sebastião Pereira Filho
DEE (UFMG) - Orientador



Prof. Dr. Eduardo Gonzaga da Silveira
Depto. Engenharia Elétrica (CEFET/MG)



Prof. Dr. Aurélio Luiz Magalhães Coelho
Depto. Engenharia Elétrica (UNIFEI)



Eng. Mestre em Ciências Eduardo Martins Gonçalves
Ger. Planejamento Eng Manutenção da Transmissão (CEMIG)

AGRADECIMENTO

Primeiramente agradecer a Deus, que me mantém firme a cada dia e focado em fazer o meu melhor e principalmente fazer o bem.

À minha família, em especial minha mãe Rita, meu pai Márcio, minhas irmãs Carla e Suzana, minha tia Chris e a Patrícia, que me apoiaram nessa caminhada. Muito obrigado por tudo que fizeram e fazem por mim.

Ao meu orientador, Clever Pereira, por todo conhecimento transmitido e por todo apoio e suporte no desenvolvimento desse trabalho.

Aos professores do LRC-*Lightning Research Center*, por todo conhecimento passado e atenção nesse período de dois anos. Agradeço também meus professores da graduação na UNIFEI, em especial ao Aurélio, meu orientador do trabalho final de graduação.

A todos os amigos e colegas que convivi nesse período de mestrado, vocês foram importantes não só pelo conhecimento compartilhado, mas também pelos momentos de descontração.

A todas as outras pessoas que sempre quiseram meu bem e torceram pelo meu sucesso.

A CAPES pelo apoio financeiro.

“A menos que modifiquemos à nossa maneira de pensar, não seremos capazes de resolver os problemas causados pela forma como nos acostumamos a ver o mundo”

Albert Einstein

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo sobre detecção e caracterização de transitórios eletromagnéticos em sinais de tensão e corrente, onde o foco são eventos reais contendo curto-circuito provenientes de linhas de transmissão. A princípio, aborda-se sobre algumas teorias de identificação de transitório, justificando sobre a escolha do filtro baseado na teoria de transformada Z, que possui algumas vantagens na implementação da rotina computacional. Em seguida, são descritas todas as etapas que envolveram a implementação do algoritmo que faz a análise dos eventos transitórios, destacando-se a etapa de caracterização, que divide em períodos os sinais analisados e gera um relatório com as suas principais informações. Posteriormente, são efetuadas avaliações preliminares em alguns casos de faltas simuladas, com o intuito de testar a eficácia da rotina computacional. Em seguida, são apresentados os casos de interesse prático e realizadas as devidas avaliações. Os resultados encontrados fornecem informações importantes a respeito de cada período de um sinal contendo transitório e ajudam a compreender o comportamento do sistema desde o período pré-falta, passando pelo curto-circuito, até o seu restabelecimento. Ademais, o relatório serve como suporte para a separação dos eventos mais relevantes.

Palavras-chave: Caracterização de eventos, Detecção de transitório, Sistemas elétricos de potência, Transitórios eletromagnéticos.

ABSTRACT

This work shows a study about the detection and characterization of electromagnetic transients in voltage and current signals. Focusing on real signals containing short circuited and coming from transmission lines. At the beginning, it approached some theories about the transient identification and justified in the way to choose a filter based on the Z-transform theory, which has some advantages in the computational routine implementation. Afterwards, all the steps involved in the algorithm construction that analyzes the transient events, were described. Highlighting the characterization stage, which divides the analyzed signals into periods and generates a report with these periods main information. Subsequently, preliminary evaluations are performed in some simulated faults cases, in order to test the effectiveness of the computational routine. Then, the practical interest cases were presented and the evaluations of each of them were carried out. The results provide important information about each signal period containing transient and help to understand the behavior of the system from the pre-fault period through the short circuit until its reestablishment. In addition, this report serves as a support to separate more relevant events.

Keywords: Electrical Power systems, Events characterization, Electromagnetic transients, Transient detection.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1– Transformada de Fourier com Janela – adaptado de [6].	24
Figura 2.2– Esquema básico de decomposição de sinal por TWD por processo de filtros em cascata de dois níveis – adaptado de [11].	25
Figura 4.1 – Fluxograma das etapas desenvolvidas no algoritmo - adaptado de [14].	34
Figura 4.2 – Tipos de sinais recebidos pela rotina computacional.	35
Figura 4.3 – Sinais de tensão de diferentes frequências e amostragem de $F_s = 240$ Hz.	37
Figura 4.4– (a) Efeitos da amostragem a F_s sem <i>aliasing</i> e (b) Com <i>aliasing</i> - adaptado de [20].	38
Figura 4.5 – Sinal original e sinal filtrado pelo filtro anti-aliasing.	38
Figura 4.6 – Sinal senoidal de corrente amostrado com 16 pontos por ciclo.	39
Figura 4.7 – Sinal senoidal de corrente com taxa de amostragem reduzida para 8 pontos por ciclo.	40
Figura 4.8 – Sinal senoidal de corrente com taxa de amostragem ampliada para 32 pontos por ciclo.	41
Figura 4.9 – Diagrama da falta trifásica para terra (ABCT) simulado no programa <i>ATPDraw</i> .	52
Figura 4.10 – Corrente trifásica para a falta ABCT simulada no programa <i>ATPDraw</i> .	53
Figura 4.11 – Interface gráfica para um sinal de corrente sob falta ABCT.	54
Figura 4.12 – Gráfico expandido do sinal da corrente da fase A para uma falta ABCT.	54
Figura 4.13 – Sinal trifásico das tensões com cada uma das fases separadas (falta ABCT).	55
Figura 4.14 – Sinal trifásico das correntes com cada uma das fases separadas (falta ABCT).	55
Figura 4.15 – Identificação do transitório nas ondas de tensão de um curto-circuito simulado do tipo ABCT.	56
Figura 4.16 – Identificação do transitório nas ondas de corrente de um curto-circuito simulado do tipo ABCT.	56

Figura 4.17 – Módulos estimados das tensões para o caso de um curto-circuito simulado do tipo ABCT.	57
Figura 4.18 – Módulos estimados das correntes para o caso de um curto-circuito simulado do tipo ABCT.	58
Figura 4.19 – Ângulos estimados das tensões para o caso de um curto-circuito simulado do tipo ABCT.	59
Figura 4.20 – Ângulos estimados das correntes para o caso de um curto-circuito simulado do tipo ABCT.	59
Figura 4.21 – Diagrama da falta bifásica (AB) simulado no programa <i>ATPDraw</i>	61
Figura 4.22 – Corrente trifásica para a falta AB simulada no programa <i>ATPDraw</i>	62
Figura 4.23 – Sinal trifásico das tensões com cada uma das fases separadas (falta AB).	62
Figura 4.24 – Sinal trifásico das correntes com cada uma das fases separadas (falta AB).	63
Figura 4.25 – Identificação do transitório nas ondas de tensão de um curto-circuito simulado do tipo AB.	63
Figura 4.26 – Identificação do transitório nas ondas de corrente de um curto-circuito simulado do tipo AB.	64
Figura 4.27– Módulos estimados das tensões para o caso de um curto-circuito simulado do tipo AB.	64
Figura 4.28 – Módulos estimados das correntes para o caso de um curto-circuito simulado do tipo AB.	65
Figura 4.29 – Ângulos estimados das tensões para o caso de um curto-circuito simulado do tipo ABCT.	65
Figura 4.30 – Ângulo estimado das correntes para o caso de um curto-circuito simulado do tipo AB.	66
Figura 5.1 – Ondas de tensão com presença de falta para uma LT de 500 kV.	69
Figura 5.2 – Ondas de corrente com presença de falta para uma LT de 500 kV.	70
Figura 5.3 – Ondas de tensão com presença de falta para uma LT de 345 kV.	70
Figura 5.4 – Ondas de corrente com presença de falta para uma LT de 345 kV.	71
Figura 5.5– Ondas de tensão com presença de transitório para uma LT de 138 kV.	71
Figura 5.6– Ondas de corrente com presença de transitório para uma LT de 138 kV.	72
Figura 5.7 – Identificação do transitório nas ondas de tensão para um curto-circuito CT presente em uma LT de 500 kV.	73

Figura 5.8 – Identificação do transitório nas ondas de corrente para um curto-circuito CT presente em uma LT de 500 kV.....	73
Figura 5.9 – Estimação fasorial nos sinais de tensão de um curto-circuito real CT...	74
Figura 5.10 – Estimação fasorial nos sinais de corrente de um curto-circuito real CT.	74
Figura 5.11– Critérios de classificação de carga na LT no período de pré-falta.....	76
Figura 5.12 – Critérios de classificação da tensão e corrente durante o transitório. .	78
Figura 5.13– Característica de operação da unidade MHO [29].	79
Figura 5.14 – Identificação de curto-circuito da fase C para terra.....	80
Figura 5.15 – Identificação do transitório nas ondas de tensão para um curto-circuito AT presente em uma LT de 345 kV	81
Figura 5.16 – Identificação do transitório nas ondas de corrente para um curto-circuito AT presente em uma LT de 345 kV.	81
Figura 5.17 – Estimação fasorial nos sinais de tensão de um curto-circuito real AT.	82
Figura 5.18 – Estimação fasorial nos sinais de corrente de um curto-circuito real AT.	82
Figura 5.19 – Identificação de curto-circuito da fase A para terra.....	85
Figura 5.20– Identificação do transitório nas ondas de tensão de uma LT de 138 kV.	87
Figura 5.21– Identificação do transitório nas ondas de corrente de uma LT de 138 kV.	87
Figura 5.22– Estimação fasorial nos sinais de tensão de uma LT de 138 kV.....	88
Figura 5.23– Estimação fasorial nos sinais de corrente de uma LT de 138 kV.	88
Figura 5.24 – Unidades do relé de distância para os sinais da LT de 138 kV.	91

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Fenômenos transitórios comuns e suas faixas de frequência em sistemas de potência –adaptado de [2].	21
Tabela 4.1– Valores usuais de impedâncias de surto e SIL para linhas de transmissão aéreas típicas de 60 Hz – adaptado de [27].	51
Tabela 4.2– Ângulos estimados para as fases de tensão no período anterior ao curto-circuito simulado do tipo ABCT.	60
Tabela 4.3– Ângulos estimados para as fases de correntes no período anterior ao curto-circuito simulado do tipo ABCT.	61
Tabela 4.4– Ângulos estimados para as fases de tensão no período anterior ao curto-circuito simulado do tipo AB.	66
Tabela 4.5– Ângulos estimados para as fases de correntes no período anterior ao curto-circuito simulado do tipo AB.	67
Tabela 5.1 – Seleção das grandezas de entrada para as unidades de relé de distância – Adaptado de [29].	79
Tabela 6.1 – Trabalhos aceitos e apresentados em eventos.	95

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ATP	<i>Alternative Transient Program</i>
CIGRE	<i>Conseil International des Grands Réseaux Électriques</i>
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
FAPEMIG	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais
GIS	<i>Gas Insulated Switchgear</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
LT	Linha de Transmissão
PPC	Pontos por Ciclo
SEP	Sistema Elétrico de Potência
PROTlab/LRC	Laboratório de Proteção Elétrica da UFMG
RDP	Registrador Digital de Perturbação
RPS	Regime Permanente Senoidal
SIL	<i>Surge Impedance Loading</i>
TWD	Transformada Wavelet Discreta
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
WDFT	<i>Windowed Discrete Fourier Transform</i>

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	16
1.1 Considerações iniciais	16
1.2 Relevância da investigação	17
1.3 Objetivos do trabalho	17
1.4 Metodologia	18
1.5 Organização do texto	18
CAPÍTULO 2 - CONCEITOS RELACIONADOS À DETECÇÃO DE TRANSITÓRIOS EM SEP	20
2.1 Considerações iniciais	20
2.2 Conceitos básicos	20
Seccionadores de <i>Gas Insulated Switchgear (GIS)</i>	21
2.3 Teorias para criação de algoritmos de detecção de transitório	22
2.3.1 A transformada de Fourier	23
2.3.2 A transformada <i>Wavelet</i>	24
2.4 Considerações finais	25
CAPÍTULO 3 - DESENVOLVIMENTO DO FILTRO DIGITAL PARA DETECÇÃO DE TRANSITÓRIOS	26
3.1 Introdução	26
3.2 Filtro digital baseado na teoria da transformada Z	27
3.3 Considerações finais	32
CAPÍTULO 4 - CARACTERIZAÇÃO DO SINAL E CONSTRUÇÃO DO ALGORITMO DETECTOR DE TRANSITÓRIO	33
4.1 Introdução	33
4.2 Algoritmo de detecção e caracterização de transitórios	35
4.2.1 Sinais de entrada	35
4.2.2 Filtragem dos sinais	36
4.2.3 Interpolação ou decimação dos sinais de entrada	39

4.2.4	Estimação fasorial	41
4.2.5	Identificação do transitório	46
4.2.6	Caracterização do evento contendo transitório	46
4.2.7	Relatório gerado pela rotina computacional	48
4.3	Avaliação preliminar de alguns casos.....	52
4.3.1	Falta ABCT simulada no ATP	52
4.3.2	Falta AB simulada no ATP	61
CAPÍTULO 5 - APLICAÇÃO DA ROTINA COMPUTACIONAL PARA AVALIAÇÕES DOS CASOS DE INTERESSE PRÁTICO		68
5.1	Introdução	68
5.2	Oscilografias analisadas para avaliação da rotina computacional	69
5.2.1	Apresentação dos casos reais de transitórios	69
5.2.2	Resultados dos casos reais de transitórios	72
CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES		93
6.1	Conclusões gerais.....	93
6.2	Propostas de continuidade.....	95
6.3	Contribuições do trabalho	95
REFERÊNCIAS.....		96

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

O sistema elétrico de potência (SEP) deve operar seguindo normas bem estabelecidas para que se possa gerar, transportar e abastecer com energia elétrica de qualidade os diversos tipos de consumidores. No entanto, mesmo seguindo estritamente as normas, o funcionamento normal do SEP pode ser alterado ou cessado devido à presença de transitórios eletromagnéticos causados por alguns fenômenos como: curtos-circuitos, descargas atmosféricas, energização de linhas de transmissão, energização de transformadores de potência, entre outros [1,2].

O relé de proteção é o principal equipamento responsável por detectar transitórios nocivos à rede e de acordo com os parâmetros pré-ajustados em sua configuração, envia comandos com a finalidade de protegê-la. Além do mais, este equipamento, juntamente com o registrador digital de perturbação (RDP), é capaz de armazenar o registro de transitórios através do armazenamento de oscilografias do evento.

Os eventos registrados servem como base de dados para uma posterior análise, porém muitos destes registros possuem pouca ou nenhuma relevância. Desta forma é interessante filtrar esse número de informações de modo que sejam armazenados apenas registros relevantes para estudos subsequentes.

1.2 Relevância da investigação

A utilização de uma rotina computacional para análise de eventos transitórios, desde que realizada por meio de uma técnica adequada, pode trazer melhorias na operação e no gerenciamento do SEP, conforme proposto em [1]. A análise, acompanhada da geração de um relatório sobre o evento, pode ser muito útil para concessionárias de energia elétrica, já que pode facilitar a tomada de decisão, agilizar a investigação do distúrbio e colaborar no planejamento da manutenção. Planejamento este que deve seguir a resolução normativa 669 da ANEEL [3]

Este trabalho compõe uma das etapas de um projeto de pesquisa de parceria público-privada. O projeto denominado “Desenvolvimento de Sistema Computacional para Diagnóstico da Condição Operativa dos Equipamentos de Proteção e Controle Utilizando Eventos do Sistema de Energia Elétrica” é uma parceria entre Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG) e Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG). Esta etapa foi desenvolvida no Laboratório de Proteção Elétrica da UFMG (PROTLab/LRC).

1.3 Objetivos do trabalho

O objetivo principal do trabalho é a implementação de uma rotina computacional para análise de sinais senoidais com a presença de transitórios do tipo curto-circuito. Os sinais são coletados de linhas de transmissões (LTs) reais no formato de oscilografias e são analisados automaticamente por um algoritmo, gerando um relatório final que conste as principais características do evento selecionado. Tal relatório tem o intuito de facilitar a interpretação do transitório em análise.

1.4 Metodologia

A primeira etapa desta dissertação consiste na realização de uma revisão bibliográfica a respeito de trabalhos publicados sobre a identificação e classificação de transitórios eletromagnéticos. Cita-se, além do método de identificação de transitório utilizado neste trabalho, outros que são propostos na literatura e também podem servir como alternativa para se obter resultados semelhantes.

Após a revisão bibliográfica, apresenta-se em detalhes a principal fundamentação teórica para implementação da rotina computacional. Nesta etapa são expostos os processos de aquisição do sinal, estimação fasorial, identificação do transitório e caracterização do evento.

Posteriormente, são analisados alguns casos de interesse prático, com a finalidade de testar a rotina computacional e validar o método utilizado.

1.5 Organização do texto

A dissertação está dividida em seis capítulos, incluindo este de introdução.

O Capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica a respeito de algumas teorias utilizadas para detecção de transitórios em sinais de corrente e tensão, expondo os prós e contras da utilização de cada uma delas.

No Capítulo 3, é desenvolvido o modelo de filtro digital utilizado para se fazer a detecção de transitórios deste trabalho. Tal modelo é baseado na teoria da transformada Z, que tem o seu equacionamento e suas principais características apresentadas.

O Capítulo 4 compreende cada uma das etapas necessárias para a implementação da rotina computacional que detecta e caracteriza um evento analisado. Aborda desde a obtenção dos sinais, passando pelos processos de filtragem, interpolação e estimação fasorial, até chegar às últimas etapas que são a identificação e caracterização do transitório. Testes preliminares são feitos em sinais simulados para validação do algoritmo construído.

No capítulo 5, é aplicada a rotina computacional em casos de interesse prático, onde é gerado um relatório que contém as principais informações a respeito de cada um dos períodos do sinal em análise e da linha de transmissão que originou o transitório. Os resultados são analisados e são feitas comparações entre dados relevantes do período pré-falta e período de transitório.

Por fim, o Capítulo 6 apresenta as conclusões desta dissertação e a proposta de continuidade futura.

Capítulo 2

CONCEITOS RELACIONADOS À DETECÇÃO DE TRANSITÓRIOS EM SEP

2.1 Considerações iniciais

O capítulo apresenta algumas características do SEP no Brasil e também as principais causas de distúrbios no sistema em geral. Além disso, são abordadas de maneira sucinta algumas teorias a respeito de identificação de transitórios em sinais de tensão e corrente, com o objetivo de estabelecer pontos de partida para a implementação de um algoritmo de detecção de transitórios em sinais senoidais.

2.2 Conceitos básicos

O sistema elétrico brasileiro opera em regime permanente senoidal (RPS) com sinais de tensão e corrente a uma frequência de 60 Hz. Alguns distúrbios, como

os citados no capítulo anterior, podem ocorrer e fazer com que o SEP deixe de operar em RPS e passe a operar em regime transitório, o que conseqüentemente altera as características dos sinais de corrente e tensão.

A mudança de características nos sinais elétricos é observada com o aparecimento de diferentes faixas de frequências no sinal que antes estava em RPS. Normalmente, há uma inserção de componentes de altas frequências nesses sinais e cada uma dessas faixas de frequência caracteriza um tipo de transitório diferente. Uma das classificações mais aceitas é a proposta pela *International Electrotechnical Commission* (IEC) e *Conseil International des Grands Réseaux Électriques* (CIGRE), onde as faixas de frequências são classificadas em quatro grupos, que são [2], [4]: oscilações de baixa frequência, de 0,1 Hz a 3 kHz; surtos de frente lenta, de 50/60 Hz a 20 kHz; surtos de frente rápida, de 10 kHz a 3 MHz; e surtos de frente muito rápida, de 100 kHz a 50 MHz.

A Tabela 2.1 apresenta alguns os fenômenos transitórios mais comuns nos sistemas de potência e suas respectivas faixas de frequências.

Tabela 2.1 – Fenômenos transitórios comuns e suas faixas de frequência em sistemas de potência –adaptado de [2].

Fenômeno	Faixa de Frequência
Ferromagnética	0,1 Hz a 1 kHz
Rejeição de carga	0,1 Hz a 3 kHz
Eliminação de faltas	50 Hz a 3 kHz
Manobra de LT	50 Hz a 20 kHz
Tensão de restabelecimento transitória	50 Hz a 100 kHz
Sobretensões de descargas atmosféricas	10 kHz a 3 MHz
Seccionadores de <i>Gas Insulated Switchgear (GIS)</i>	100 kHz a 50 MHz

O acontecimento de qualquer um destes eventos citados na Tabela 2.1 pode alterar o comportamento dos sinais da rede. Caso esta alteração seja significativa e tenha um potencial danoso ao sistema, a proteção irá atuar para que não se tenha prejuízos pessoais e materiais.

Para exemplificar situações que podem gerar estes tipos de prejuízos tem-se, por exemplo, o acontecimento de um curto-circuito em uma LT. Caso esse curto-circuito não seja identificado rapidamente, ele pode resultar na queima de

equipamentos caros como transformadores, banco de capacitores, aparelhos de medição e instrumentação. Isto pode causar prejuízos para as concessionárias de energia elétrica na queima de equipamentos e também para os clientes que podem ter a interrupção do abastecimento de energia. Esta interrupção pode resultar em prejuízo financeiro para as concessionárias que podem sofrer deduções de “Parcela Variável” em seu “Pagamento Base” conforme apresentado na resolução normativa 729 da ANEEL [5]. Além do mais, pessoas podem se acidentar ao entrar em contato com uma parte energizada do sistema.

Para evitar tais danos, o SEP possui um sistema de proteção que é capaz de identificar a ocorrência de um distúrbio e enviar comandos de maneira rápida para cessar os problemas que possam oferecer riscos a rede. A identificação destes problemas se faz através do constante monitoramento dos sinais de corrente e tensão, que são os principais parâmetros observados para identificar a ocorrência de transitórios.

Na constante monitoração do sistema, os relés de proteção digital são os principais aparelhos responsáveis em identificar automaticamente a presença de transitórios e assim tomarem decisões sobre qual ação executar dependendo do tipo de problema detectado por eles.

O tópico seguinte aborda algumas teorias que podem ser utilizadas na implementação destes algoritmos para detecção de transitório.

2.3 Teorias para criação de algoritmos de detecção de transitório

Existe uma variedade de teorias que podem ser utilizadas na criação de algoritmos capazes de identificar transitórios presentes em um sinal de corrente e/ou tensão. Cada uma tem sua particularidade e se baseia em algum princípio matemático.

As teorias presentes neste tópico são abordadas superficialmente, já que não são utilizadas para o desenvolvimento deste trabalho, porém servem como alternativas para a construção de algoritmos que identificam a presença de transitório.

2.3.1 A transformada de Fourier

A Transformada de *Fourier* é capaz de identificar a presença de transitórios em um sinal senoidal, já que através desta técnica pode-se decompor o sinal nas frequências que o constitui e assim encontrar algum distúrbio. Para sinais amostrados, pode-se utilizar a Transformada Discreta de Fourier, porém esta técnica é ideal para sinais estacionários e a análise ocorre no domínio da frequência [6].

Os sinais que possuem transitórios típicos do SEP, que normalmente são não estacionários, podem conter oscilações de alta frequência e impulsos localizados superpostos aos sinais da frequência fundamental e seus harmônicos [7]. A análise destes tipos de sinais já não é adequada utilizando a Transformada Discreta de Fourier, já que as diferentes frequências encontradas não poderão dar uma localização no domínio do tempo [6], [8].

Uma alternativa para a análise dos sinais de tensão e corrente que contém transitórios é a Transformada Discreta de Fourier com Janela, que vem do inglês *Windowed Discrete Fourier Transform* (WDFT) [7]. Na técnica WDFT escolhe-se uma função janela, cuja largura deve ser igual ao segmento do sinal para o qual a condição de sua estacionariedade seja válida. Esta função janela é multiplicada pelo sinal de entrada e deve ser transladada continuamente sobre o sinal analisado, onde o sinal é dividido em pequenos segmentos no tempo [6], [7]. Para cada uma dessas janelas é aplicada a Transformada Discreta de Fourier, desta forma, a cada janela um espectro de frequência apresenta o conteúdo deste intervalo de tempo, mapeando o sinal em uma função bidimensional de tempo e frequência, conforme mostra a Figura 2.1. Percebe-se pela Figura 2.1 que a janela tem um tamanho fixo e é utilizada para todas as frequências, desta forma, independente das componentes serem de alta ou baixa frequência, o tamanho da janela será o mesmo [6].

Os estudos da WDFT indicam que quanto menor a janela de observação, melhor será a localização no tempo, porém pior será a resolução em frequência. Não se pode obter localizações precisas simultaneamente no tempo e na frequência, conforme apresentado em [7].

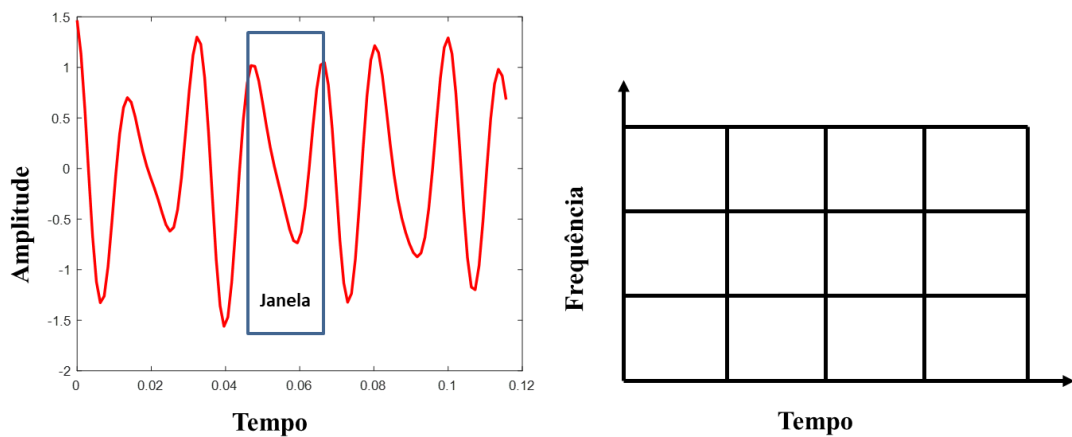


Figura 2.1– Transformada de Fourier com Janela – adaptado de [6].

2.3.2 A transformada *Wavelet*

Uma técnica muito conhecida e utilizada é a Transformada *Wavelet* Discreta (TWD), que comparada a transformada de *Fourier*, possui a vantagem de obter os resultados diretamente no domínio do tempo. Uma boa maneira de aplicar a TWD é através da análise multiresolução, que consiste basicamente em aplicar um sinal em filtros passa-altas e passa-baixas, permitindo analisar o sinal em múltiplas bandas de frequência [9].

De forma sucinta, a Figura 2.2 descreve o processo de TWD com filtragem em cascata em um sinal de entrada S , que passa por um filtro passa-baixa e é decimado de dois, no que resulta em um sinal denominado “aproximado”, representado pela letra A . O mesmo sinal de entrada passa por um filtro passa-alta e é decimado de dois, dando origem a um sinal denominado “detalhado”, representado pela letra D . No caso de filtragens em cascata com diversos níveis, o sinal original é reconstruído como a soma de todos os sinais detalhados e o aproximado de mais alto nível. Por exemplo, para o caso de dois níveis, o sinal S é representado pela soma de $D1$, $D2$ e $A2$.

A utilização desta teoria de TWD permite, através de algoritmos de diferentes autores, detectar a presença de transitórios em um sinal. Ao usuário que deseja utilizar esta teoria para detecção de transitório, o programa MATLAB apresenta em sua plataforma diversas funções para realização da TWD [10].

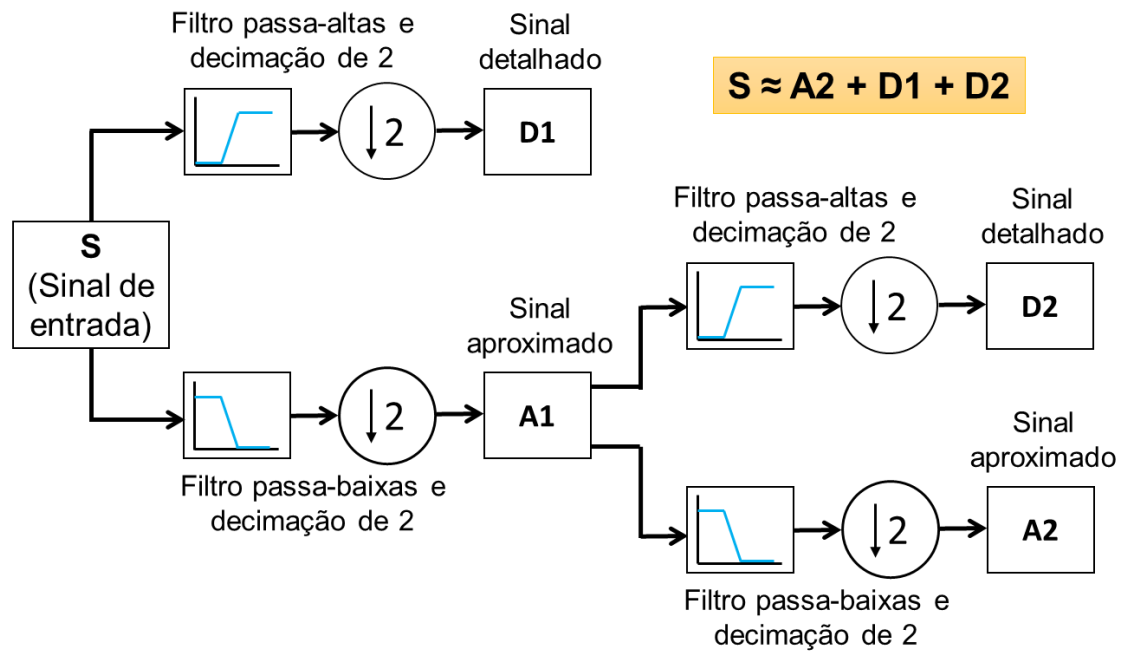


Figura 2.2– Esquema básico de decomposição de sinal por TWD por processo de filtros em cascata de dois níveis – adaptado de [11].

2.4 Considerações finais

Neste capítulo abordou-se sobre os principais distúrbios que afetam o SEP e as faixas de frequências que esses eventos se concentram. Também foi realizado um breve apanhado a respeito de teorias que podem ser utilizadas na construção de algoritmos para detectar transitórios. Pôde-se observar algumas vantagens e desvantagens na utilização de cada uma delas.

O próximo capítulo detalha a principal teoria utilizada como base para construção do algoritmo de detecção de transitório deste trabalho.

Capítulo 3

DESENVOLVIMENTO DO FILTRO DIGITAL PARA DETECÇÃO DE TRANSITÓRIOS

3.1 Introdução

Para a implementação de um algoritmo de detecção de transitórios em SEP existe uma variedade de filtros digitais que podem ser utilizados, conforme apresentado no capítulo 2. Um filtro baseado na Transformada de Fourier, apesar de excelente ferramenta para identificação de componentes de altas frequências, não é tão efetivo na indicação da posição no domínio do tempo. A Transformada *Wavelet* é uma alternativa eficaz e possui uma variedade de algoritmos diferentes que podem ser utilizados na identificação de transitório, porém não foi a técnica escolhida para utilização neste trabalho, já que procurou-se utilizar um algoritmo mais simples possível para evitar elevados níveis de processamento.

Optou-se pela escolha de um filtro baseado na teoria de transformada Z, que é matematicamente mais simples e possui uma resposta computacional mais rápida, além de ser mais preciso na localização do ponto de transitório.

3.2 Filtro digital baseado na teoria da transformada Z

A modelagem matemática do filtro digital aplicando alguns conceitos da transformada Z pode ser visto nas próximas equações.

Considere um sinal senoidal representado pela função $x(t)$ [12], dada por:

$$\begin{aligned} x(t) &= X_m \operatorname{sen}(\omega t + \phi) = X_m (\operatorname{sen} \omega t \cos \phi + \cos \omega t \operatorname{sen} \phi) = \\ &= X_m \cos \phi \operatorname{sen} \omega t + X_m \operatorname{sen} \phi \cos \omega t = [X_m \cos \phi] \operatorname{sen} \omega t + [X_m \operatorname{sen} \phi] \cos \omega t = \quad (1) \\ &= A \operatorname{sen} \omega t + B \cos \omega t = Ax_1(t) + Bx_2(t) \end{aligned}$$

considerando-se a amostragem da Equação (1) em instantes discretos de tempo, obtém-se a função discretizada dada por:

$$\begin{aligned} x(kT) &= x(k) = X_m \operatorname{sen}(\omega kT + \phi) = X_m [\operatorname{sen}(\omega kT) \cos \phi + \cos(\omega kT) \operatorname{sen} \phi] = \\ &= X_m \cos \phi \operatorname{sen}(\omega kT) + X_m \operatorname{sen} \phi \cos(\omega kT) = \\ &= [X_m \cos \phi] \operatorname{sen}(\omega kT) + [X_m \operatorname{sen} \phi] \cos(\omega kT) = \quad (2) \\ &= A \operatorname{sen}(\omega kT) + B \cos(\omega kT) = Ax_1(kT) + Bx_2(kT) \end{aligned}$$

nas Equações (1) e (2), $x_1(t)$ e $x_2(t)$ são as funções seno e cosseno, ω é a frequência angular, que é igual a $2\pi f_0$, f_0 é a frequência fundamental, T é o intervalo de amostragem e k é um número inteiro relacionado a amostra. As constantes A e B são, respectivamente, as partes real e imaginária do fasor associado às ondas senoidais definidas nas Equações (1) e (2), descritas como:

$$\begin{cases} A = X_m \cos \phi \\ B = X_m \operatorname{sen} \phi \end{cases} \quad (3)$$

sabe-se que as transformadas Z das funções seno e cosseno são da forma:

$$\begin{aligned}
 x_1(k) = \text{sen}(\omega kT) = \text{sen}(k\omega T) = \text{sen}(k\theta) & \Leftrightarrow X_1(z) = \frac{z \text{sen}(\omega T)}{z^2 - 2z \cos(\omega T) + 1} \\
 x_2(k) = \text{cos}(\omega kT) = \text{cos}(k\omega T) = \text{cos}(k\theta) & \Leftrightarrow X_2(z) = \frac{z[z - \cos(\omega T)]}{z^2 - 2z \cos(\omega T) + 1}
 \end{aligned} \tag{4}$$

em que $\theta = \omega T$ e representa o ângulo entre as amostras. Assim, a transformada Z da função expressa na Equação (2) pode ser descrita como:

$$X(z) = AX_1(z) + BX_2(z) = A \frac{z \text{sen}(\omega T)}{z^2 - 2z \cos(\omega T) + 1} + B \frac{z[z - \cos(\omega T)]}{z^2 - 2z \cos(\omega T) + 1} \tag{5}$$

rearranjando os termos da Equação (5) tem-se:

$$\begin{aligned}
 & A[z^2 X_1(z) - 2 \cos(\omega T) z X_1(z) + X_1(z) - z \text{sen}(\omega T)] + \\
 & + B[z^2 X_2(z) - 2 \cos(\omega T) z X_2(z) + X_2(z) - z^2 + z \cos(\omega T)] = 0
 \end{aligned} \tag{6}$$

como no caso geral A e B são diferentes de zero, então a solução da Equação (6) pode ser obtida resolvendo-se:

$$\begin{cases} z^2 X_1(z) - 2 \cos(\omega T) z X_1(z) + X_1(z) - z \text{sen}(\omega T) = 0 \\ z^2 X_2(z) - 2 \cos(\omega T) z X_2(z) + X_2(z) - z^2 + z \cos(\omega T) = 0 \end{cases} \tag{7}$$

Sabe-se que a transformada Z possui as seguintes propriedades:

$$\begin{cases} y_k & \Leftrightarrow Y z \\ y_{k+1} & \Leftrightarrow zY z - zy_0 \\ y_{k+2} & \Leftrightarrow z^2 Y z - z^2 [y_0 + z^{-1} y_1] \\ \vdots & \vdots \\ y_{k+n} & \Leftrightarrow z^n Y z - z^n [y_0 + z^{-1} y_1 + z^{-2} y_2 + \dots + z^{-n+1} y_{n-1}] \end{cases} \tag{8}$$

de posse das propriedades da transformada Z apresentadas na Equação (8), que podem ser vistas com mais detalhes em [13], e considerando, inicialmente, apenas a função $x_1(t)$, tem-se que:

$$\left\{ \begin{array}{l} x_1(k) = \text{sen}(\omega k T) \quad \Leftrightarrow \quad X_1(z) \\ x_1(k+1) = \text{sen}[\omega(k+1)T] \quad \Leftrightarrow \quad z X_1(z) - z x_1(0) = z X_1(z) - \\ \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad - z \text{sen}(\omega \cdot 0 \cdot T) = z X_1(z) \\ x_1(k+2) = \text{sen}[\omega(k+2)T] \quad \Leftrightarrow \quad z^2 X_1(z) - z^2 [x_1(0) + z^{-1} x_1(1)] = \\ \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad = z^2 X_1(z) - z^2 [\text{sen}(\omega \cdot 0 \cdot T) + z^{-1} \text{sen}(\omega \cdot 1 \cdot T)] = \\ \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad = z^2 X_1(z) - z \text{sen}(\omega T) \end{array} \right. \quad (9)$$

considerando agora apenas a função $x_2(t)$, obtém-se:

$$\left\{ \begin{array}{l} x_2(k) = \cos(\omega k T) \quad \Leftrightarrow \quad X_2(z) \\ x_2(k+1) = \cos[\omega(k+1)T] \quad \Leftrightarrow \quad z X_2(z) - z x_2(0) = z X_2(z) - z \cos(\omega \cdot 0 \cdot T) = \\ \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad = z X_2(z) - z \\ x_2(k+2) = \cos[\omega(k+2)T] \quad \Leftrightarrow \quad z^2 X_2(z) - z^2 [x_2(0) + z^{-1} x_2(1)] = \\ \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad = z^2 X_2(z) - z^2 [\cos(\omega \cdot 0 \cdot T) + z^{-1} \cos(\omega \cdot 1 \cdot T)] = \\ \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad = z^2 X_2(z) - z^2 - z \cos(\omega T) \end{array} \right. \quad (10)$$

efetuando mudanças de posições nos elementos da primeira das Equações (7), resulta em:

$$[z^2 X_1(z) - z \text{sen}(\omega T)] - 2 \cos(\omega T) [z X_1(z)] + [X_1(z)] = 0 \quad (11)$$

Passando a Equação (11) para o domínio do tempo discreto, levando em consideração as propriedades expressas em (9), tem-se:

$$x_1(k+2) - 2 \cos(\omega T) x_1(k+1) + x_1(k) = 0 \quad (12)$$

Agora efetuando mudanças de posições e algumas operações aritméticas nos elementos da segunda das Equações (7), obtém-se:

$$\left[z^2 X_2(z) - z^2 - z \cos(\omega T) \right] - 2 \cos(\omega T) \left[z X_2(z) - z \right] + X_2(z) = 0 \quad (13)$$

Passando a Equação (13) para o domínio do tempo discreto, levando em consideração as propriedades expressas na Equação (10), resulta que:

$$x_2(k+2) - 2 \cos(\omega T) x_2(k+1) + x_2(k) = 0 \quad (14)$$

A Equação (12) multiplicada por A e a Equação (14) multiplicada por B juntamente com a soma destas duas expressões, resulta em:

$$\begin{aligned} & A \left[x_1(k+2) - 2 \cos(\omega T) x_1(k+1) + x_1(k) \right] + \\ & + B \left[x_2(k+2) - 2 \cos(\omega T) x_2(k+1) + x_2(k) \right] = 0 \end{aligned} \quad (15)$$

Efetando algumas operações aritméticas na Equação (15), obtém-se:

$$\begin{aligned} & Ax_1(k+2) - 2 \cos(\omega T) Ax_1(k+1) + Ax_1(k) + \\ & + Bx_2(k+2) - 2 \cos(\omega T) Bx_2(k+1) + Bx_2(k) = 0 \end{aligned} \quad (16)$$

ou ainda:

$$\begin{aligned} & \left[Ax_1(k+2) + Bx_2(k+2) \right] - 2 \cos(\omega T) \left[Ax_1(k+1) + Bx_2(k+1) \right] + \\ & + \left[Ax_1(k) + Bx_2(k) \right] = 0 \end{aligned} \quad (17)$$

a Equação (17) rearranjada e simplificada como feito na Equação (2) resulta em:

$$x(k+2) - 2 \cos(\omega T) x(k+1) + x(k) = 0 \quad (18)$$

efetuando uma mudança de variável e considerando-se $n = k + 2$, a Equação (18) pode ser reescrita como:-

$$x(n) - 2\cos(\omega T)x(n-1) + x(n-2) = 0 \quad (19)$$

denominando as variáveis da Equação (19) como:

$$\begin{cases} a = 2\cos(\omega T) \\ \omega = 2\pi f_0 \\ f_0 = 60 \text{ Hz} \end{cases} \quad (20)$$

obtém-se a expressão final:

$$x(n) = ax(n-1) - x(n-2) \quad (21)$$

a Equação (21), como descrito em [12], mostra como calcular o n -ésimo termo de uma função senoidal a partir de dois termos passados, $(n-1)$ e $(n-2)$, conhecidos a frequência fundamental f_0 , o intervalo de amostragem T e a variável a , definidos na Equação (20). Ela também pode ser utilizada na verificação de alguma mudança numa onda senoidal, o que pode ser resultado de alguma variação brusca no estado do SEP. Desta forma, admitindo-se a existência de um erro $\varepsilon(n)$, dado por:

$$\varepsilon(n) = x(n) - [ax(n-1) - x(n-2)] = x(n) - ax(n-1) + x(n-2) \quad (22)$$

pode-se estipular que se o erro $\varepsilon(n)$ é menor que uma dada tolerância, a onda continua sendo a mesma senoidal, ou seja, não houve mudança de estado no sinal do SEP. Assim, tem-se que:

$$\begin{cases} \varepsilon(n) \leq \text{tolerância} & \Rightarrow & \text{é senoide} & \Rightarrow & \text{não houve mudança} \\ \varepsilon(n) > \text{tolerância} & \Rightarrow & \text{não é senoide} & \Rightarrow & \text{houve mudança} \end{cases} \quad (23)$$

os valores de tolerância devem ser ajustados e definidos a partir de testes realizados após a construção do algoritmo de detecção de transitório (empiricamente).

3.3 Considerações finais

Neste capítulo, apresentou-se o filtro digital utilizado como base para construção do algoritmo de detecção de transitório deste trabalho, onde demonstrou-se todo o equacionamento matemático responsável por obter as principais funções que são aplicadas na rotina computacional.

A expressão final representada pela Equação (21), mostra como encontrar uma amostra futura na escala de tempo conhecendo-se duas amostras passadas, ou seja, a utilização desta expressão em uma onda senoidal pode revelar onde estaria o próximo ponto de um sinal senoidal apenas conhecendo-se duas amostras passadas. A partir deste raciocínio, o transitório presente em um sinal pode ser localizado da seguinte maneira: realiza-se uma varredura nas amostras da onda de tensão ou corrente e, sabendo que o transitório altera a forma de onda de um sinal do SEP, a lógica do algoritmo pode detectar quando este ponto futuro não está em sua posição correta, indicando a presença de alteração na onda analisada.

O próximo capítulo aborda todas as etapas envolvidas na construção da rotina computacional deste trabalho.

Capítulo 4

CARACTERIZAÇÃO DO SINAL E CONSTRUÇÃO DO ALGORITMO DETECTOR DE TRANSITÓRIO

4.1 Introdução

Neste capítulo, apresentam-se todas as etapas envolvidas na implementação de uma rotina computacional para identificação e caracterização de sinais do SEP com a presença de transitórios eletromagnéticos.

A Figura 4.1 exibe um fluxograma das etapas, onde o primeiro passo na construção do algoritmo é o recebimento de sinais de tensão e corrente, que a priori, podem ser provenientes tanto de simulações quanto de oscilografias do SEP.

Após a aquisição dos sinais, ocorre o processo de interpolação ou decimação, que basicamente alteram o número de pontos por ciclo do sinal. Em seguida, os sinais são filtrados por um filtro passa-baixas e se encaminham para o processo de estimação fasorial de cada uma das fases. Posteriormente, ocorre uma varredura nas amostras dos sinais na busca de identificar a presença de transitórios.

Caso seja encontrado, o sinal é classificado a partir de cálculos derivados das teorias de análise de SEP.



Figura 4.1 – Fluxograma das etapas desenvolvidas no algoritmo - adaptado de [14].

4.2 Algoritmo de detecção e caracterização de transitórios

O algoritmo desenvolvido neste trabalho foi criado no *software* MATLAB e os detalhes de suas etapas, apresentadas no fluxograma da Figura 4.1, são apresentados nos sub-tópicos a seguir.

4.2.1 Sinais de entrada

Os sinais de entrada utilizados neste trabalho são de corrente e tensão provenientes tanto de simulações em softwares de circuitos elétricos como ATPDraw (*Alternative Transient Program*) e MATLAB®, como também de oscilografias.

A Figura 4.2 apresenta um esquemático das origens dos sinais reais e simulados das tensões e correntes que podem ser utilizados no programa.

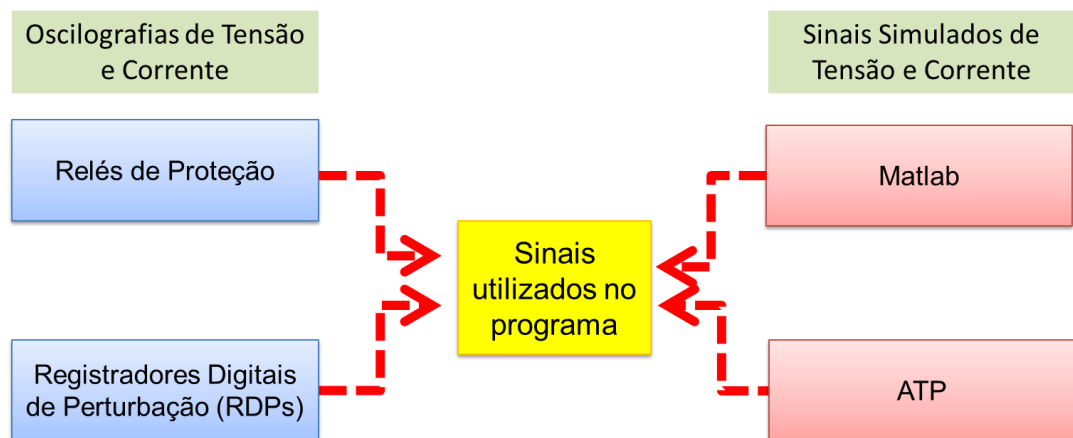


Figura 4.2 – Tipos de sinais recebidos pela rotina computacional.

Os dados simulados pelo software MATLAB® podem ser utilizados diretamente na rotina, já que esta foi criada na mesma plataforma que os dados gerados. Alternativamente, pode-se utilizar um programa de simulação de circuitos elétricos contendo transitórios, como o *ATPDraw*, onde os gráficos das tensões e correntes podem ser armazenados no formato “.mat” (MATLAB) e posteriormente serem utilizados como casos de análise da rotina criada.

Os sinais reais (oscilografias), são provenientes dos registros oscilográficos de RDPs e relés de proteção. Os arquivos normalmente são registrados em formato COMTRADE e armazenam indiretamente, além dos sinais de tensão e corrente, dados importantes da linha de transmissão, como o comprimento da linha, os valores de resistência e indutância, estado do disjuntor, teleproteção, entre outras informações relevantes.

O primeiro passo da rotina computacional é a leitura dos sinais de entrada, que nos casos de dados reais, possui um leitor de arquivos COMTRADE. Assim, são lidas as informações do evento registrado. Em seguida, pode-se passar para etapa de filtragem.

4.2.2 Filtragem dos sinais

Os sinais de entrada são tratados por um filtro *anti-aliasing* passa-baixa com a intenção de minimizar os efeitos de componentes harmônicas que podem surgir com o aparecimento do transitório. Assim, as frequências superiores à de corte do filtro, juntamente com os ruídos são atenuados, eliminando as grandes distorções que possam ocorrer nos sinais analisados [15], [16].

A utilização do teorema de amostragem de Nyquist pode auxiliar na explicação do efeito de *aliasing*, que ocorre quando há uma sobreposição do espectro de frequência de um sinal, causando distorções em suas formas de onda [17]. Este teorema diz que a frequência de amostragem utilizada para reconstrução de um sinal deve ser maior ou igual a duas vezes a frequência máxima do sinal a se amostrar. De outra forma, pode se dizer que um sinal a uma taxa de amostragem F_s , não pode conter frequência maior ou igual à $F_s/2$. Caso isso ocorra, pode surgir o efeito de *aliasing* e o sinal pode não ser reconstruído de maneira adequada [18]–[20].

A Figura 4.3 ajuda a entender o teorema de amostragem de Nyquist. Observam-se três sinais senoidais, cada um deles plotado em uma frequência diferente, sendo elas: 60, 300 e 540 Hz. Destacado em um círculo vermelho, tem-se as amostras coletadas na mesma posição no eixo dos tempos, para os três sinais. As amostras são coletadas em uma frequência de amostragem de $F_s = 240$ Hz.

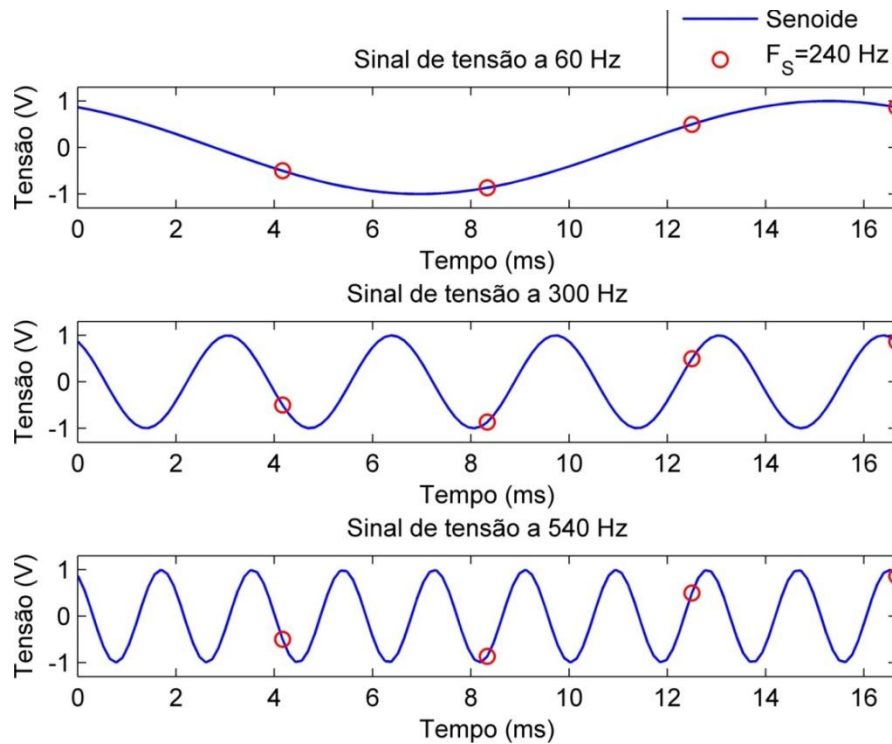


Figura 4.3 – Sinais de tensão de diferentes frequências e amostragem de $F_S = 240$ Hz.

A partir do teorema de amostragem de Nyquist, apenas a senoide de 60 Hz poderia ser reconstruída, pois é o único sinal onde a frequência de amostragem é maior ou igual a duas vezes a frequência do sinal original. Nos sinais de 300 Hz e 540 Hz não seria possível a reconstrução, já que essa regra não é respeitada.

Intuitivamente, percebe-se a possibilidade ou não de reconstrução dos sinais ao analisar a Figura 4.3. Observando as amostras coletadas na onda de 60 Hz nota-se a possibilidade de reconstruir o sinal através da ligação de uma amostra a outra. Já nas outras duas senoides, de 300 e 540 Hz respectivamente, visivelmente não há como serem reconstruídas, já que a união dessas amostras resultaria em uma forma de onda diferente das originais.

A Figura 4.4 mostra dois casos de espectro de frequência, onde pode ocorrer ou não a presença de *aliasing*. Na Figura 4.4(a) não há sobreposição dos espectros, logo não ocorre o efeito *aliasing* e o sinal pode ser reconstruído. Já na Figura 4.4(b), observa-se uma sobreposição de espectro, o que caracteriza a presença do *aliasing*.

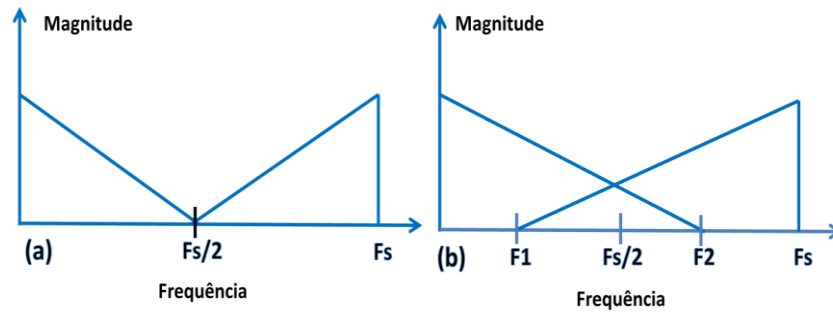


Figura 4.4– (a) Efeitos da amostragem a F_s sem *aliasing* e (b) Com *aliasing* - adaptado de [20].

No âmbito da proteção elétrica é importante à utilização do filtro *anti-aliasing*, já que os sinais de tensão e corrente após uma falta apresentam transitórios de altas frequências, o que pode levar a erros na localização da falta [21].

A Figura 4.5, apresenta em sua parte superior o sinal original de uma fase de corrente sob o efeito de curto-circuito, enquanto na parte inferior este já se encontra filtrado. Nota-se que a utilização do filtro *anti-aliasing* remove os transitórios de altas frequências presentes no sinal original, o que justifica a implementação deste filtro no algoritmo.

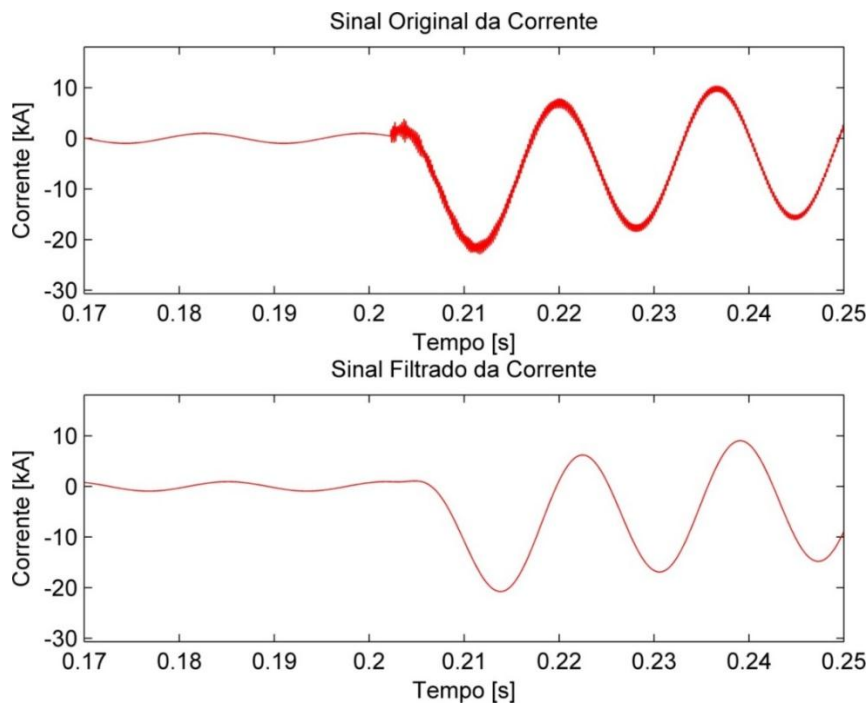


Figura 4.5 – Sinal original e sinal filtrado pelo filtro anti-aliasing.

Implementado o filtro, passa-se a próxima etapa de desenvolvimento da rotina computacional.

4.2.3 Interpolação ou decimação dos sinais de entrada

Os sinais de tensão e corrente analisados dentro da rotina computacional são sinais discretos, ou seja, são oriundos da amostragem de um sinal contínuo e possuem um determinado número de pontos por ciclo (PPC). O número de PPC em um sinal vai depender do valor da taxa de tempo em que se coleta cada amostra, ou seja, de quanto em quanto tempo se retira uma amostra de determinado sinal.

A Figura 4.6 apresenta um exemplo de sinal senoidal amostrado com um número de PPC igual 16. A área hachurada destaca a janela de um ciclo completo da senoide, onde os 16 círculos azuis representam as amostras, que ligadas pela linha vermelha formam o contorno da senoide.

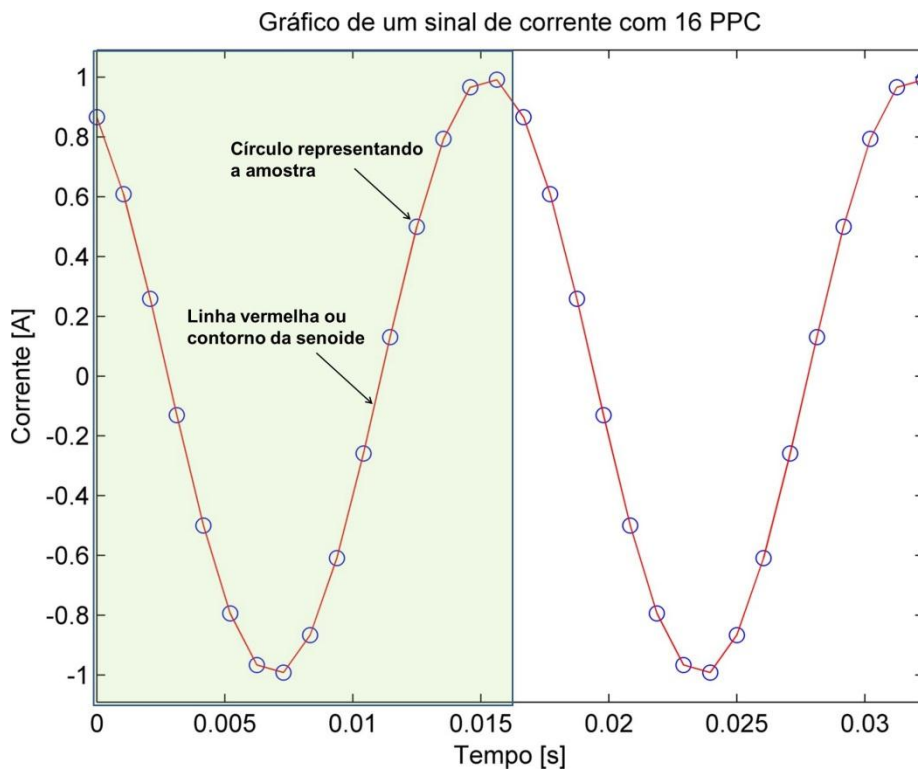


Figura 4.6 – Sinal senoidal de corrente amostrado com 16 pontos por ciclo.

Os processos de decimação e interpolação alteram a taxa de amostragem de um sinal, ou seja, modificam seu número de PPC.

A Figura 4.7 apresenta um caso onde se tem uma diminuição da taxa de amostragem da Figura 4.6, neste caso houve uma decimação do sinal. A Figura 4.6 que tinha 16 PPC, teve sua taxa de amostragem reduzida para 8 PPC.

A Figura 4.8 mostra uma ampliação da taxa de amostragem da Figura 4.6, quando o sinal passou de 16 pontos por ciclo para 32 PPC, ocorrendo o processo de interpolação, onde são criados pontos entre uma amostra e outra.

Ao receber os sinais de entrada, a rotina computacional faz a contagem do número de amostras por ciclo que tem o sinal original e aplica a interpolação ou decimação nos casos em que a taxa seja diferente de 32 PPC, que é o número de amostras por ciclo fixado para ser utilizado neste trabalho.

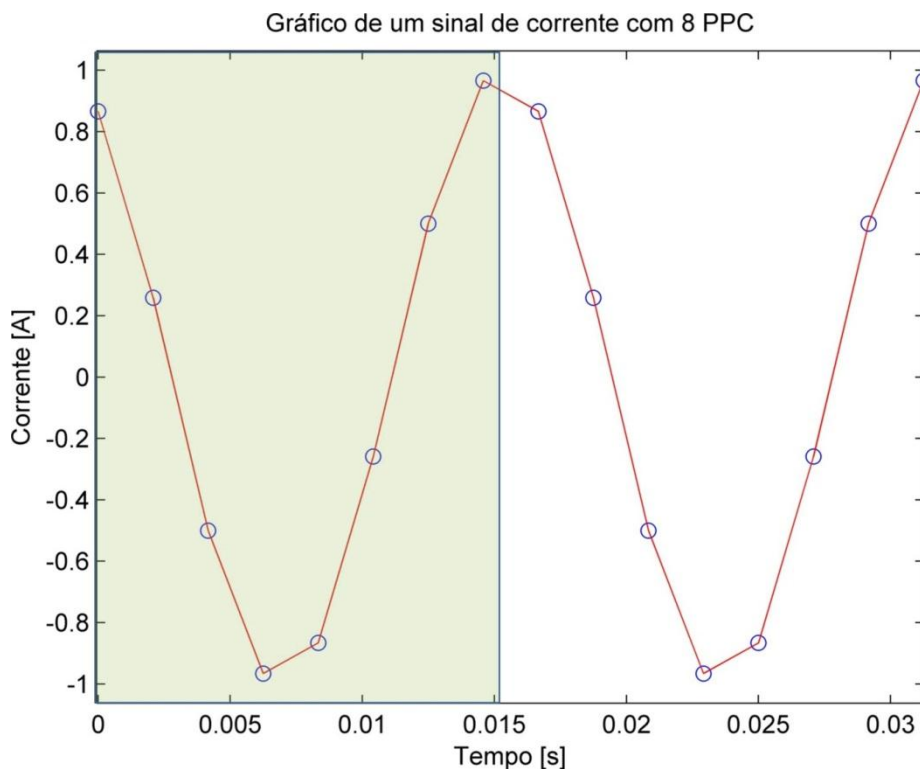


Figura 4.7 – Sinal senoidal de corrente com taxa de amostragem reduzida para 8 pontos por ciclo.

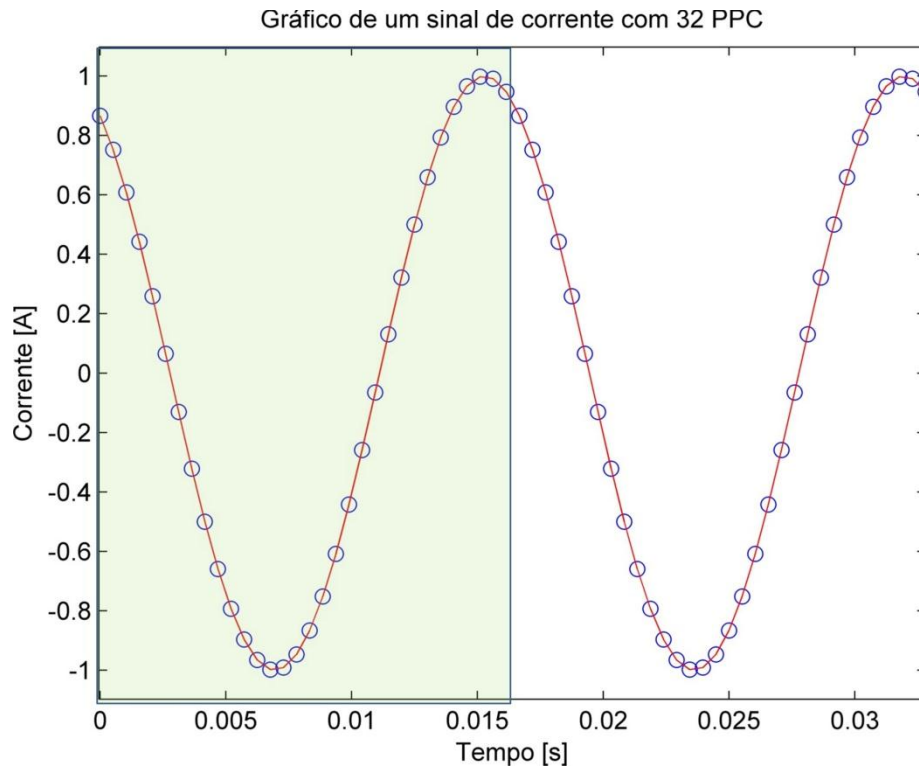


Figura 4.8 – Sinal senoidal de corrente com taxa de amostragem ampliada para 32 pontos por ciclo.

4.2.4 Estimação fasorial

A estimação fasorial consiste em coletar cada amostra do sinal senoidal de tensão e corrente e transformá-la num valor de módulo e ângulo, ou seja, transformar cada ponto do sinal em um fasor.

Na literatura existem diversos algoritmos para estimação fasorial, entre eles o de Fourier, de Mann & Morrison [22], de Gilcrest & Rockfeller [23], algoritmo baseado no método dos erros mínimos quadrados, entre outros [24]. Para este trabalho decidiu-se implementar o dos erros dos mínimos quadrados devido a sua confiabilidade e precisão na estimação fasorial. Este algoritmo foi proposto por Sachdev & Baribeau [25], e é conhecido como “algoritmo dos mínimos quadrados”.

Neste método, consideram-se os sinais de entrada formados por uma exponencial decrescente e um conjunto de ondas senoidais, como mostrado na Equação (24) a seguir [24]–[26]:

$$y(t) = a_0 e^{-t/\tau} + \sum_{h=1}^H a_m \text{sen}(h\omega_0 t + \phi_m) \quad (24)$$

em que h assume apenas os valores 1 e 3, que representam o primeiro e terceiro harmônico, respectivamente. Desta forma:

$$y(t) = a_0 e^{-t/\tau} + a_1 \text{sen}(\omega_0 t + \phi_1) + a_3 \text{sen}(3\omega_0 t + \phi_3) + \xi(t) \quad (25)$$

em que ω_0 representa a frequência angular fundamental, ξ é o erro que se comete ao aproximar as amostras de uma função $y(t)$ pela função composta da exponencial e das senoides de primeiro e terceiro harmônico.

Posteriormente, são consideradas aproximações polinomiais para a exponencial decrescente através da série de Taylor [25]. Desta forma:

$$e^{-t/\tau} = 1 - \frac{t}{\tau} + \frac{1}{2!} \left(\frac{t}{\tau}\right)^2 - \frac{1}{3!} \left(\frac{t}{\tau}\right)^3 + \dots \quad (26)$$

Os autores consideram no trabalho [25] apenas os três primeiros termos da série da Equação (26), desta forma a Equação (25) pode ser reescrita como:

$$y(t) = a_0 - \left(\frac{a_0}{\tau}\right)t + \left(\frac{a_0}{2\tau^2}\right)t^2 + a_1 \text{sen}(\omega_0 t + \phi_1) + a_3 \text{sen}(3\omega_0 t + \phi_3) + \varepsilon(t) \quad (27)$$

em que ε é o erro anterior, somado ao erro que se comete ao se considerar apenas os três primeiros termos da Equação (26). Utilizando-se de identidades trigonométricas, pode-se reescrever a Equação (27) como:

$$\begin{aligned} y(t) = & a_0 + a_1 \cos \phi_1 \text{sen}(\omega_0 t) + a_1 \text{sen} \phi_1 \cos(\omega_0 t) + \\ & + a_3 \cos \phi_3 \text{sen}(3\omega_0 t) + a_3 \text{sen} \phi_3 \cos(3\omega_0 t) - \left(\frac{a_0}{\tau}\right)t + \left(\frac{a_0}{2\tau^2}\right)t^2 + \varepsilon(t) \end{aligned} \quad (28)$$

Admitindo-se os coeficientes sendo:

$$\begin{aligned}
 \theta_1 &= a_0 \\
 \theta_2 &= a_1 \cos \phi_1 \\
 \theta_3 &= a_1 \text{sen} \phi_1 \\
 \theta_4 &= a_3 \cos \phi_3 \\
 \theta_5 &= a_3 \text{sen} \phi_3 \\
 \theta_6 &= -\left(\frac{a_0}{\tau}\right) \\
 \theta_7 &= \frac{a_0}{2\tau^2}
 \end{aligned} \tag{29}$$

pode-se reescrever a Equação (28) como:

$$\begin{aligned}
 y(t) &= \theta_1 + \theta_2 \text{sen}(\omega_0 t) + \theta_3 \cos(\omega_0 t) + \\
 &+ \theta_4 \text{sen}(3\omega_0 t) + \theta_5 \cos(3\omega_0 t) - \theta_6 t + \theta_7 t^2 + \varepsilon(t)
 \end{aligned} \tag{30}$$

considerando-se os vetores linha dados por:

$$\bar{x}^T(t) = [1 \quad \text{sen}(\omega_0 t) \quad \cos(\omega_0 t) \quad \text{sen}(3\omega_0 t) \quad \cos(3\omega_0 t) \quad t \quad t^2] \tag{31}$$

$$\bar{\theta}^T = [\theta_1 \quad \theta_2 \quad \theta_3 \quad \theta_4 \quad \theta_5 \quad \theta_6 \quad \theta_7] \tag{32}$$

a função $y(t)$ pode ser expressa na forma matricial como:

$$y(t) = \bar{x}^T(t) \cdot \bar{\theta} + \varepsilon(t) \tag{33}$$

em que \bar{x}^T é o vetor linha de regressores e $\bar{\theta}$ é o vetor coluna de coeficientes a se determinar.

A ideia é encontrar um conjunto de M coeficientes (no caso do trabalho de Sachdev & Baribeau [25], $M=7$), de maneira que o erro ε se torne o mínimo possível

e assim ser eliminado da Equação (33). Desta forma, considerando o erro desprezível, a Equação (33) pode ser reescrita como:

$$y(t) \approx \bar{x}^T(t) \cdot \bar{\theta} \quad (34)$$

Pode-se representar a Equação (34) de maneira discreta, tomando-se N amostras $y(t_k) = y_k$ em instantes discretos $t_k = k \cdot \Delta t$, o vetor $\bar{x}^T(t)$, denominado anteriormente de vetor dos regressores, torna-se $\bar{x}^T(t_k)$. O vetor $\bar{x}^T(t_k)$ é conhecido, já que trata-se de um vetor com funções que podem ser calculadas nos instantes t_k .

O algoritmo proposto mostra que deve-se determinar os sete coeficientes (θ_i ; $i=1, \dots, 7$), sendo necessárias um número de amostras N maior que 7 [24]. De maneira matricial as N equações podem ser escritas para cada instante k na forma:

$$\begin{bmatrix} y_k \\ y_{k-1} \\ y_{k-2} \\ y_{k-3} \\ y_{k-4} \\ y_{k-5} \\ y_{k-6} \\ \vdots \\ y_{k-(N-1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \text{sen}\omega_0 t_k & \text{cos}\omega_0 t_k & \text{sen}3\omega_0 t_k & \text{cos}3\omega_0 t_k & t_k & t_k^2 \\ 1 & \text{sen}\omega_0 t_{k-1} & \text{cos}\omega_0 t_{k-1} & \text{sen}3\omega_0 t_{k-1} & \text{cos}3\omega_0 t_{k-1} & t_{k-1} & t_{k-1}^2 \\ 1 & \text{sen}\omega_0 t_{k-2} & \text{cos}\omega_0 t_{k-2} & \text{sen}3\omega_0 t_{k-2} & \text{cos}3\omega_0 t_{k-2} & t_{k-2} & t_{k-2}^2 \\ 1 & \text{sen}\omega_0 t_{k-3} & \text{cos}\omega_0 t_{k-3} & \text{sen}3\omega_0 t_{k-3} & \text{cos}3\omega_0 t_{k-3} & t_{k-3} & t_{k-3}^2 \\ 1 & \text{sen}\omega_0 t_{k-4} & \text{cos}\omega_0 t_{k-4} & \text{sen}3\omega_0 t_{k-4} & \text{cos}3\omega_0 t_{k-4} & t_{k-4} & t_{k-4}^2 \\ 1 & \text{sen}\omega_0 t_{k-5} & \text{cos}\omega_0 t_{k-5} & \text{sen}3\omega_0 t_{k-5} & \text{cos}3\omega_0 t_{k-5} & t_{k-5} & t_{k-5}^2 \\ 1 & \text{sen}\omega_0 t_{k-6} & \text{cos}\omega_0 t_{k-6} & \text{sen}3\omega_0 t_{k-6} & \text{cos}3\omega_0 t_{k-6} & t_{k-6} & t_{k-6}^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \text{sen}\omega_0 t_{k-(N-1)} & \text{cos}\omega_0 t_{k-(N-1)} & \text{sen}3\omega_0 t_{k-(N-1)} & \text{cos}3\omega_0 t_{k-(N-1)} & t_{k-(N-1)} & t_{k-(N-1)}^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \\ \theta_4 \\ \theta_5 \\ \theta_6 \\ \theta_7 \end{bmatrix} \quad (35)$$

ou seja:

$$\begin{matrix} \bar{Y}_k & = & \tilde{X}_k & \cdot & \bar{\theta}_k \\ (N \times 1) & & (N \times 7) & & (7 \times 1) \end{matrix} \quad (36)$$

No caso em que se tenha um número de amostras maior que o número de coeficientes, pode-se resolver aplicando o método da pseudo-inversa [24], determinando-se o vetor dos coeficientes $\bar{\theta}_k$, assim pode-se proceder como:

$$\begin{matrix} \tilde{X}_k^T & \bar{Y}_k & = & \tilde{X}_k^T & \tilde{X}_k & \cdot & \bar{\theta}_k \\ (7 \times N) & (N \times 1) & & (7 \times N) & (N \times 7) & & (7 \times 1) \end{matrix} \quad (37)$$

ou ainda:

$$\bar{\theta}_k = \begin{pmatrix} \tilde{X}_k^T & \tilde{X}_k \\ (7 \times N) & (N \times 7) \end{pmatrix}^{-1} \begin{matrix} \tilde{X}_k^T & \bar{Y}_k \\ (7 \times N) & (N \times 1) \end{matrix} = \begin{matrix} \tilde{P}_k & \bar{Y}_k \\ (7 \times N) & (N \times 1) \end{matrix} \quad (38)$$

esta equação pode ser escrita em sua forma matricial, resultando em:

$$\begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \\ \theta_4 \\ \theta_5 \\ \theta_6 \\ \theta_7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & \cdots & P_{17} & \cdots & P_{1N} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} & \cdots & P_{27} & \cdots & P_{2N} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} & \cdots & P_{37} & \cdots & P_{3N} \\ P_{41} & P_{42} & P_{43} & \cdots & P_{47} & \cdots & P_{4N} \\ P_{51} & P_{52} & P_{53} & \cdots & P_{57} & \cdots & P_{5N} \\ P_{61} & P_{62} & P_{63} & \cdots & P_{67} & \cdots & P_{6N} \\ P_{71} & P_{72} & P_{73} & \cdots & P_{77} & \cdots & P_{7N} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} y_k \\ y_{k-1} \\ y_{k-2} \\ \vdots \\ y_{k-6} \\ \vdots \\ y_{k-(N-1)} \end{bmatrix} \quad (39)$$

O fasor que se quer determinar no instante t_k , que está associada a componente de primeiro harmônico, ou fundamental é dado por:

$$\bar{Y}_k = \bar{\theta}_{2k} + j \bar{\theta}_{3k} = |Y| e^{j\alpha} \quad (40)$$

fazendo-se necessário apenas o cálculo dos coeficientes θ_{2k} e θ_{3k} , que são dados respectivamente pela multiplicação da segunda e terceira linhas da matriz P_k , pelo vetor de amostras \bar{Y}_k no instante t_k , desta forma:

$$\begin{cases} \theta_{2k} = P_{21} y_k + P_{22} y_{k-1} + P_{23} y_{k-2} + \cdots + P_{27} y_{k-6} + \cdots + P_{2N} y_{k-(N-1)} \\ \theta_{3k} = P_{31} y_k + P_{32} y_{k-1} + P_{33} y_{k-2} + \cdots + P_{37} y_{k-6} + \cdots + P_{3N} y_{k-(N-1)} \end{cases} \quad (41)$$

Assim, pela Equação (40) e Equação (41) pode ser calculado o fasor que se quer estimar, lembrando que a matriz dos regressores pode ser calculada uma única vez [27] e utilizada nos restantes das estimações, desta forma o fasor estimado irá girar com uma velocidade igual a ω_0 [14].

4.2.5 Identificação do transitório

A identificação de transitório é a etapa onde os sinais de corrente e tensão são analisados e graficamente apresentam os trechos do evento onde houve alteração da forma de onda senoidal.

Dentro da rotina computacional, a identificação do transitório ocorre de maneira automática a partir da implementação do algoritmo baseado no filtro digital utilizando propriedades da transformada Z. O capítulo 3 tratou detalhadamente do desenvolvimento matemático deste filtro, apresentando a fundamentação teórica para a sua construção.

O final deste capítulo (tópico 4.3), apresenta alguns exemplos de identificação de transitórios em sinais simulados, tratando-se de testes preliminares para validação da rotina implementada.

4.2.6 Caracterização do evento contendo transitório

A caracterização do evento é uma etapa posterior à identificação de transitórios e consiste em dividir e classificar a onda em períodos relevantes de acordo com suas características. Estes períodos são classificados em: pré-falta, falta, disjuntor aberto (tempo morto), religamento com sucesso e religamento sem sucesso.

Em seguida, são detalhadas as características dos períodos criados:

Pré-falta: considerado como regime permanente senoidal, quando o sistema está funcionando normalmente com suas ondas de tensão e corrente senoidais na frequência de 60 Hz. Algumas características observadas neste período são:

- Tensão próxima à da nominal da linha.

- Comportamento das ondas de tensão e corrente em regime permanente senoidal com frequência de 60 Hz.
- Presença majoritária de primeiro harmônico.
- Valores baixos (irrelevantes) de correntes de sequência negativa e/ou zero, caracterizando regime permanente senoidal com correntes e tensões simétricas de sequência positiva de fases.

Falta: caracterizado pela presença de transitório nas ondas analisadas. No caso deste estudo, o foco principal são os transitórios do tipo curto-circuito, que possuem as seguintes características mais relevantes:

- Ocorrência de sobrecorrente em uma ou mais fases afetadas pelo curto.
- Ocorrência de subtensão em uma ou mais fases.
- Valor relevante de corrente de sequência negativa, exceto para o curto-circuito trifásico.
- Valor relevante de corrente de sequência zero no período em que ocorre o curto-circuito envolvendo a terra.

Disjuntor aberto (tempo morto): período em que o sistema é interrompido com a abertura do disjuntor. Algumas de suas características são:

- Correntes das fases com um valor bem próximo a zero, devido à abertura do disjuntor. Sendo $0 \leq |I| \leq \epsilon$, onde $|I|$ é o módulo da corrente das fases e ϵ é um valor mínimo de erro para a corrente que se deve mensurar a partir de testes práticos, já que na realidade este valor não é o zero absoluto.
- A tensão na maioria das vezes é quase nula, como a corrente citada no item anterior, porém este fator não pode ser tido como verdade em todos os casos, já que alguns eventos de sinais obtidos de linhas de transmissões apresentam valores de tensões mesmo com o disjuntor aberto, pois pode haver alimentação da linha pelo outro terminal onde os disjuntores ainda não abriram.

Religamento com sucesso: quando o sistema obtém sucesso ao tentar se restabelecer após uma abertura de disjuntor. Este período é descrito a seguir:

- No religamento com sucesso o sinal de tensão e corrente, após o fechamento do disjuntor, volta a operar com um comportamento de regime permanente senoidal com frequência de 60 Hz. Neste caso, o curto-circuito foi extinto e a rede volta a sua operação normal. Sendo assim, passa-se a notar todas as características citadas no primeiro estágio de pré-falta. Pode-se observar transitórios em alguma das fases no início do restabelecimento do sistema devido a manobra de fechamento do disjuntor, mas normalmente não causam danos.

Religamento sem sucesso: quando o sistema não obtém sucesso ao tentar se restabelecer após uma abertura de disjuntor, como descrito a seguir:

- No religamento sem sucesso, o disjuntor é fechado na tentativa de restabelecer o sistema, porém ele é aberto novamente pela proteção devido a persistência das características anormais da rede.

4.2.7 Relatório gerado pela rotina computacional

Um complemento para a caracterização dos eventos reais analisados é a geração de um relatório que contém os dados mais relevantes da LT. Dados estes obtidos diretamente das oscilografias e também calculados a partir de grandezas coletadas.

A seguir, no Quadro 4.1, apresenta-se parte de um relatório de um evento oscilográfico de curto-circuito exibido pela rotina computacional, em que a fonte do texto está mantida como a do arquivo original.

Inicialmente, o relatório apresenta dados básicos da LT como o nome, a data, o horário em que o evento foi registrado, a frequência em que a rede opera, a tensão nominal, o comprimento em quilômetros, as resistências e reatâncias de sequência positiva e zero.

Quadro 4.1 - Dados gerais de uma LT de 500 kV obtidas de uma oscilografia

Dados da Linha: LT [REDACTED] 500 kV
 Data: 02/11/2003 Hora: 15:40:57
 Tipo de RDP: MEHTA001
 Frequência da rede = 60 Hz
 Tensão nominal = 500 kV
 Comprimento da Linha (LT) = 148.56 km
 Resistência de seq. positiva = 0.024 ohm/km
 Resistência de seq. zero = 0.339 ohm/km
 Reatância de seq. positiva = 0.354 ohm/km
 Reatância de seq. zero = 1.311 ohm/km
 Impedância de surto estimada: Entre 272 ohms e 280 ohms
 SIL da LT estimado: Entre 894 MW e 919 MW

Os dados informados no Quadro 4.1 possibilitam o cálculo de outros parâmetros da LT, como a impedância de surto e a carga natural ou *Surge Impedance Loading* (SIL). A impedância de surto Z_0 é uma grandeza relativa à linha de transmissão e é calculada como o valor da impedância característica Z_c da LT quando a frequência tende ao infinito [28], como descrito pelas equações:

$$Z_0 = \lim_{\omega \rightarrow \infty} Z_c(\omega) = \lim_{\omega \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad (42)$$

dividindo o numerador e denominador da Equação (43) por ω [29], chega-se a:

$$Z_0 = \lim_{\omega \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{\frac{R}{\omega} + jL}{\frac{G}{\omega} + jC}} = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (43)$$

em que R é a resistência longitudinal unitária (Ω/km); ω é a frequência angular (rad/s); L a indutância longitudinal unitária (H/km); G a condutância transversal unitária (S/km); e C a capacitância transversal unitária (F/km).

Nota-se que a impedância de surto é na verdade uma resistência, uma vez que sua parte imaginária é nula. O seu cálculo permite que possa ser definido o SIL de uma LT. Além do mais, essa impedância assume um papel importante no cálculo de sobretensões causadas devido a descargas atmosféricas [28].

A carga natural ou SIL é um conceito muito importante na análise da operação de linhas de transmissão, já que está intimamente ligado ao carregamento de uma LT. O SIL é definido como a potência entregue por uma linha ideal sem perdas ($R=G=0$) a uma carga resistiva igual a sua impedância de surto Z_0 quando a LT estiver energizada com sua tensão nominal. Apesar de ser um conceito definido para linhas ideais, pode ser utilizado como um bom indicador para linhas reais, já que estas possuem perdas baixas, limitadas a 5% [28].

A Equação (44) mostra como é calculado o SIL para sistemas trifásicos:

$$\text{SIL}_{3\phi} = \frac{|V_{\text{nom}(\phi\phi)}|^2}{Z_0} \quad (44)$$

De posse da Equação (44), pode-se calcular o valor do SIL que é exibido no relatório apresentado no Quadro 4.1, porém são apresentados dois valores, tanto para o SIL quanto para a impedância de surto. Isto porque o cálculo da impedância de surto depende da capacitância da linha, conforme mostrado na Equação (43), que por sua vez depende da velocidade de propagação. A velocidade de propagação para linhas aéreas de sequência positiva e negativa é da ordem de 290.000 km/s a 298.000 km/s [28]. Desta forma, os valores de impedância de surto e SIL são calculados para essas duas faixas de velocidades, caso o valor da capacitância de sequência positiva da LT não seja fornecido. Assim, no caso do valor da capacitância da LT não ser fornecido, ele é estimado pela rotina computacional. Caso fosse fornecido, a capacitância utilizada seria a da oscilografia e conseqüentemente haveria apenas um valor de impedância de surto e de SIL calculados.

A Equação (45) mostra como é calculado a capacitância a partir da velocidade de propagação:

$$a = \frac{1}{\sqrt{LC}} \Rightarrow a^2 = \frac{1}{LC} \Rightarrow C = \frac{1}{a^2 L} \quad (45)$$

em que “a” é a velocidade de propagação, L a indutância longitudinal e C a capacitância transversal da LT.

O relatório apresentado no início deste tópico mostra os dados de uma LT de 500 kV e de comprimento 148,56 km. Utilizando-se os dois valores diferentes de velocidade de propagação nos cálculos, a impedância característica calculada é de 272 Ω e 280 Ω , já o SIL calculado é de 894 MW e 919 MW. A comparação destes valores pode ser feita consultando a Tabela 4.1, que mostra os valores usuais de impedâncias de surto e do SIL para LTs trifásicas aéreas de diferentes níveis de tensão nominal.

Tabela 4.1– Valores usuais de impedâncias de surto e SIL para linhas de transmissão aéreas típicas de 60 Hz – adaptado de [28].

V_{nom} (kV)	Z_0 (Ω)	SIL (MW)
69	366-400	12-13
138	366-405	47-52
230	365-395	134-145
345	280-366	325-425
500	233-294	850-1075
765	254-266	2200-2300

Para a linha de 500 kV, a Tabela 4.1 mostra que os valores de impedância de surto estão entre 233 Ω e 294 Ω , desta forma as impedâncias características calculadas (272 Ω e 280 Ω) estão dentro da faixa estabelecida. O SIL apresenta uma faixa de variação entre 850 MW e 1075 MW pela Tabela 4.1, e os valores calculados foram de 894 MW e 919 MW, validando também o cálculo efetuado.

O relatório completo exhibe informações como tensão, corrente, fator de potência, carga na linha, dentre outros dados para cada um dos períodos criados, porém sua exibição integral é apresentada apenas no capítulo 5.

4.3 Avaliação preliminar de alguns casos

Este tópico analisa alguns casos de curto-circuito provenientes de simulações que foram realizadas utilizando o *software ATPDraw*. Os testes preliminares do algoritmo são executados nestes tipos de caso por não conterem ruídos e outros componentes indesejáveis do sistema. Assim, podem-se obter resultados satisfatórios em menor tempo, agilizando o ajuste do algoritmo para os casos reais.

São apresentados dois casos de curtos-circuitos, sendo um trifásico para a terra e um bifásico sem a presença da terra. Escolheu-se estes casos para simulação por serem casos não encontrados nas oscilografias. Todos os sinais avaliados, simulados no *ATPDraw*, são de um sistema de 765 kV composto de duas fontes equivalentes e uma linha de transmissão. As fases serão nomeadas como A, B, C e a terra será nomeada pela letra T.

4.3.1 Falta ABCT simulada no ATP

O primeiro caso simulado refere-se a um curto-circuito trifásico para a terra (ABCT), ocorrido à jusante (à frente) do relé, dentro de sua zona de proteção, a uma distância de, aproximadamente, 5 km de linha de transmissão e com um tempo de simulação de 0,4 segundo. Considera-se a presença de uma resistência de falta de valor igual a 2 Ω . A Figura 4.9 apresenta o diagrama do circuito da falta ABCT criada no programa *ATPDraw*, enquanto a Figura 4.10 ilustra a corrente trifásica obtida na simulação. Percebe-se pela Figura 4.10 que, no instante igual a 0,2 segundo inicia-se o transitório, onde a forma de onda do sinal de corrente muda drasticamente, com um aumento da amplitude nas três fases, caracterizando o curto-circuito trifásico.

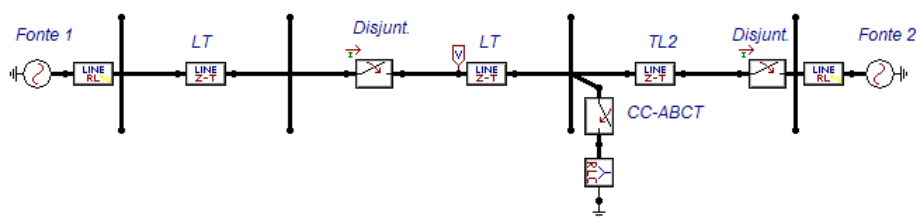


Figura 4.9 – Diagrama da falta trifásica para terra (ABCT) simulado no programa *ATPDraw*.

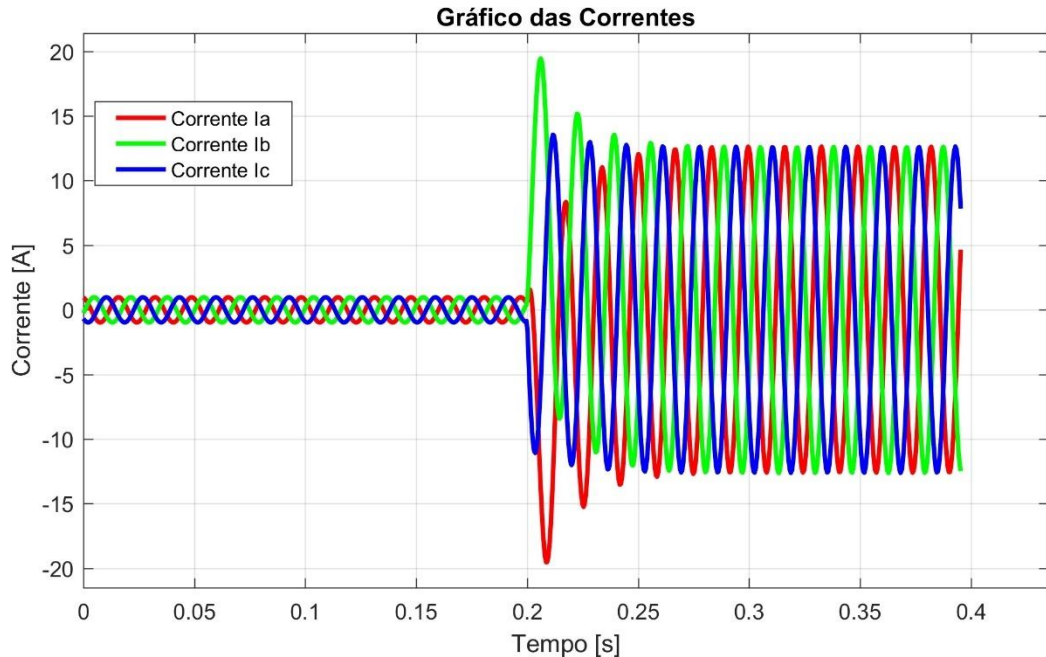


Figura 4.10 – Corrente trifásica para a falta ABCT simulada no programa *ATPDraw*.

Para os testes preliminares criou-se uma interface gráfica no próprio *software* Matlab, onde o programa exibe algumas informações sobre o sinal, como mostrado na Figura 4.11. Ao se carregar um evento para análise, deve-se inserir como dados de entrada a frequência nominal e o valor de erro admissível utilizado para detecção do transitório. Posteriormente, é gerado o gráfico dos sinais trifásicos (lado esquerdo da interface), com todas as ondas já filtradas.

Para a análise do transitório, as correntes das fases A, B e C são exibidas separadamente, para que se possa identificar o ponto inicial e final em cada uma delas.

A corrente da fase A, apresentada na Figura 4.11 (lado direito da interface), mostra que a rotina identificou corretamente tanto o início quanto o final do transitório, como destacado pelas linhas tracejadas em preto na vertical. Informações como os tempos e amostras de início e fim do transitório também são apresentadas. Além disso, há a opção de expandir o gráfico da detecção do transitório, para que a figura possa ser visualizada em uma escala maior, facilitando a análise do evento.

A Figura 4.12 apresenta o sinal da corrente da fase A utilizando a função de expansão do gráfico.

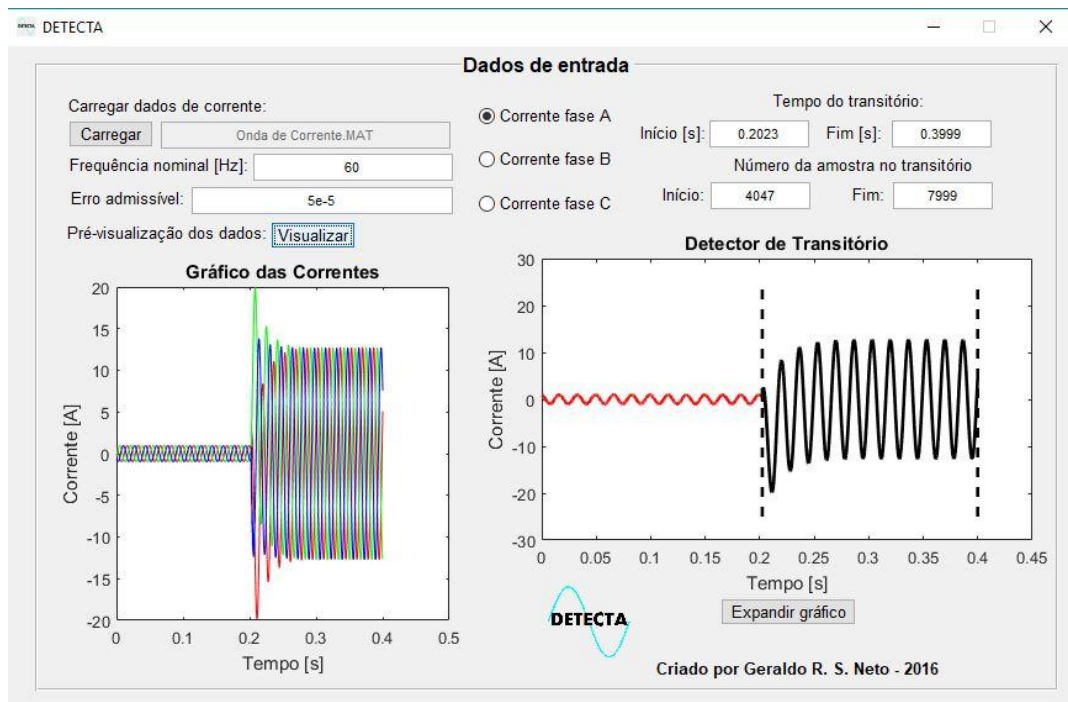


Figura 4.11 – Interface gráfica para um sinal de corrente sob falta ABCT.

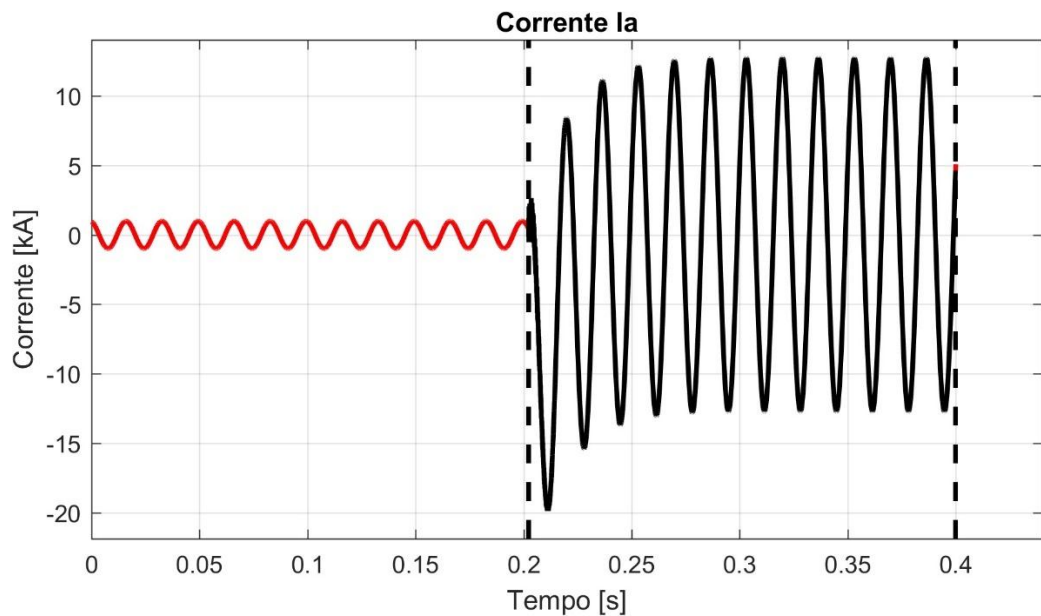


Figura 4.12 – Gráfico expandido do sinal da corrente da fase A para uma falta ABCT.

A Figura 4.13 e Figura 4.14 apresentam todas os gráficos de tensão e corrente agrupados. Pela Figura 4.13 percebe-se uma acentuada atenuação nos sinais de tensão das três fases, característica observada em um curto-circuito trifásico. Já na Figura 4.14, tem-se um aumento expressivo nas amplitudes das

correntes em todas as três fases, aparecendo também componentes exponenciais no início do transitório das fases A e B.

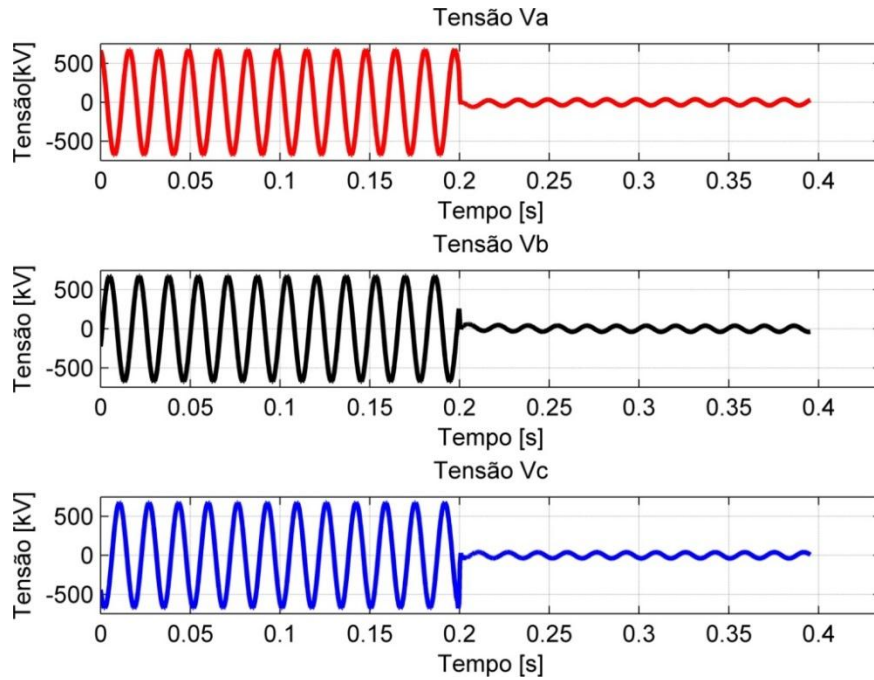


Figura 4.13 – Sinal trifásico das tensões com cada uma das fases separadas (falta ABCT).

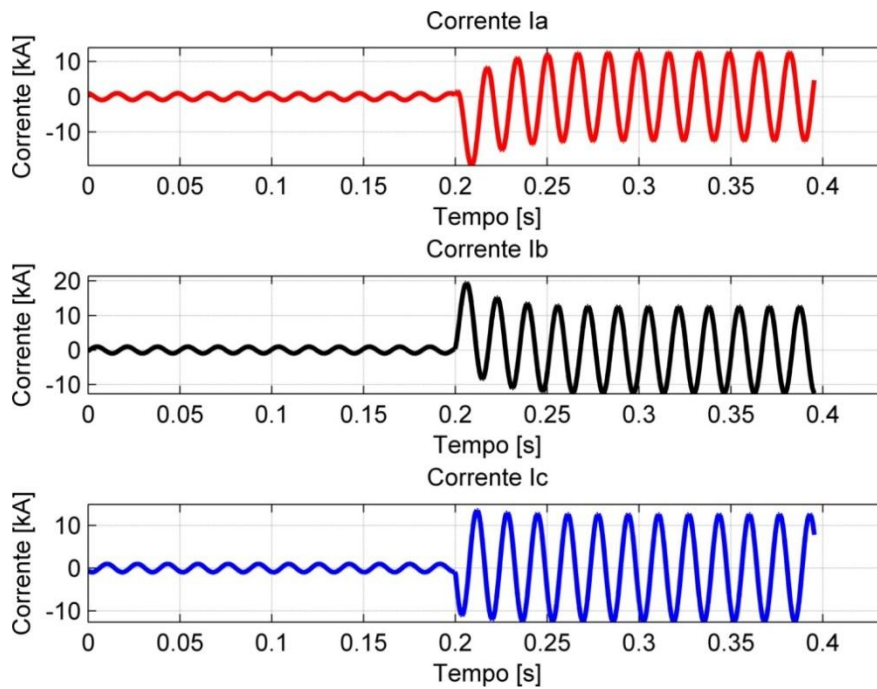


Figura 4.14 – Sinal trifásico das correntes com cada uma das fases separadas (falta ABCT).

Em seguida, as Figura 4.15 e Figura 4.16, mostram os sinais de tensão e corrente com as suas respectivas identificações automáticas dos transitórios em cada fase. A parte dos sinais que representa o transitório está destacado na cor verde e entre barras verticais pretas.

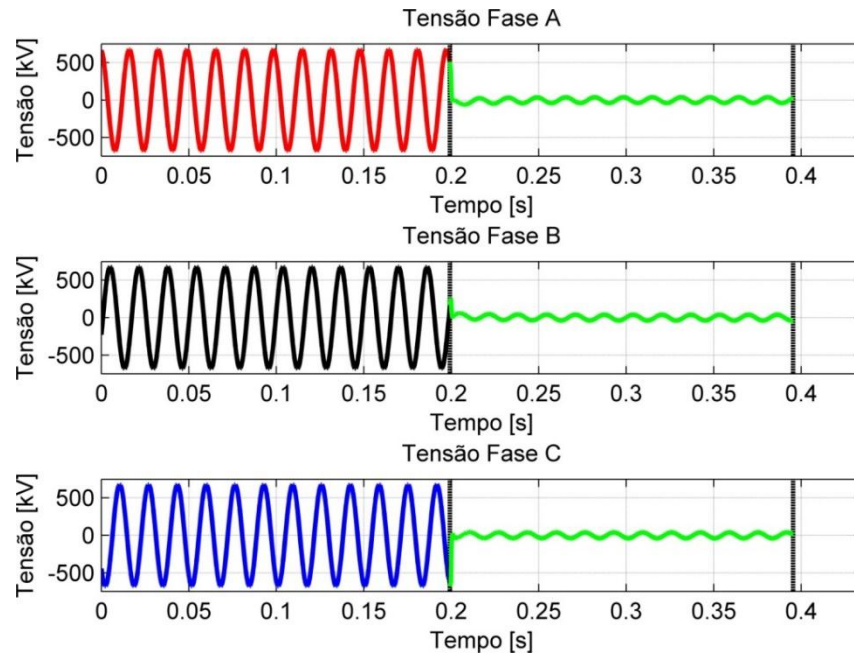


Figura 4.15 – Identificação do transitório nas ondas de tensão de um curto-circuito simulado do tipo ABCT.

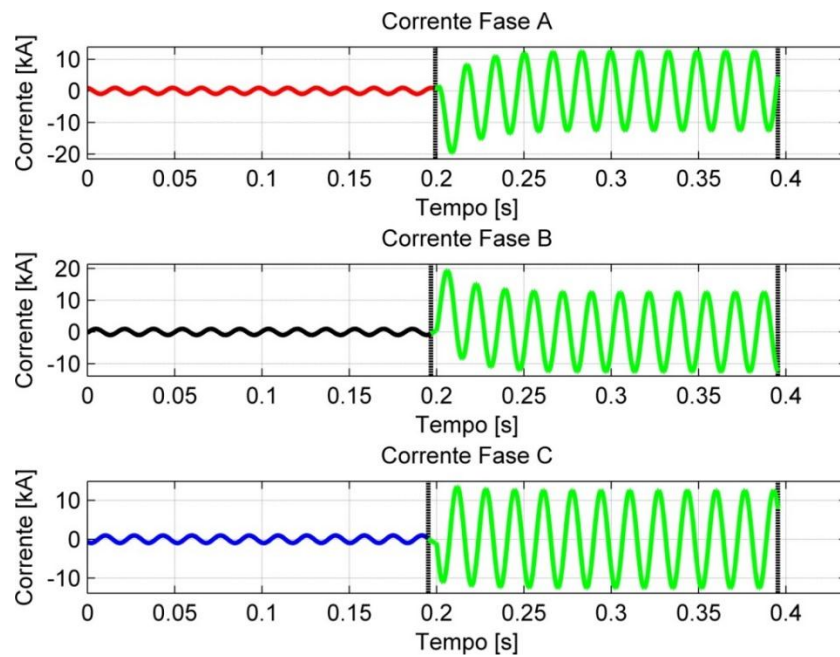


Figura 4.16 – Identificação do transitório nas ondas de corrente de um curto-circuito simulado do tipo ABCT.

Um parâmetro importante para se tirar diversas informações sobre o sistema a partir dos sinais de corrente e tensão é a estimação fasorial, que consiste em estimar os valores de módulos e fases dos sinais de tensão e corrente para cada instante de tempo discreto. Com os resultados da aplicação desta técnica, pode-se calcular diversas grandezas que ajudam a entender o funcionamento do SEP.

Para representar graficamente a estimação fasorial, a Figura 4.17 e Figura 4.18 mostram os módulos dos fasores associados a cada uma das fases de tensão e corrente, respectivamente. Estão apresentados na cor magenta e suas amplitudes referem-se ao valor de pico de cada uma das fases.

O método utilizado para estimação é o dos mínimos quadrados e observando as Figura 4.17 e Figura 4.18, pode-se perceber que os primeiros valores estimados só acontecem depois de passado um ciclo dos sinais senoidais de tensão e corrente, isto porque a rotina computacional necessita de um ciclo completo, ou neste caso 32 pontos, para realizar a primeira operação.

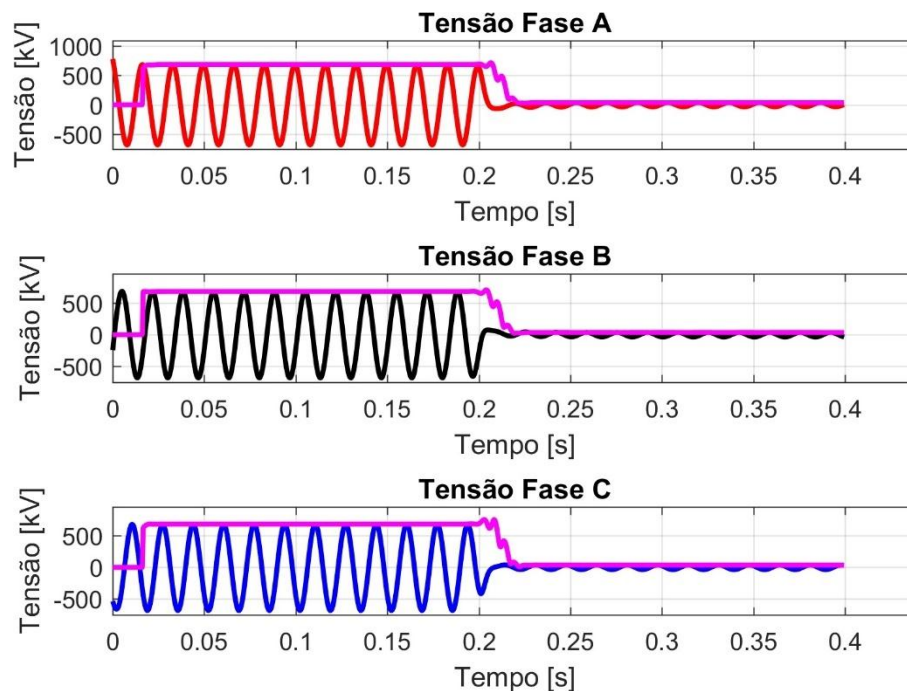


Figura 4.17 – Módulos estimados das tensões para o caso de um curto-circuito simulado do tipo ABCT.

Observando a Figura 4.17, em qualquer uma das fases que se analise, nota-se que há o início do transitório no eixo dos tempos em 0,2 segundo. Neste momento a estimação do módulo oscila enquanto vai caindo o seu valor de

amplitude, até atingir um valor próximo de zero na escala de tensão. Esta oscilação numérica no início do transitório é comum, já que neste ponto aparecem componentes diferentes da fundamental, o que resulta em uma distorção da onda senoidal e conseqüentemente uma variação na estimação fasorial. Na Figura 4.18 ocorre o mesmo efeito, só que neste caso a oscilação ocorre enquanto o módulo da corrente estimada vai crescendo, já que é uma característica comum durante o curto-circuito. Após pouco mais de um ciclo, quando a corrente se estabiliza, os módulos deixam de oscilar e passam a ser estimados com precisão novamente.

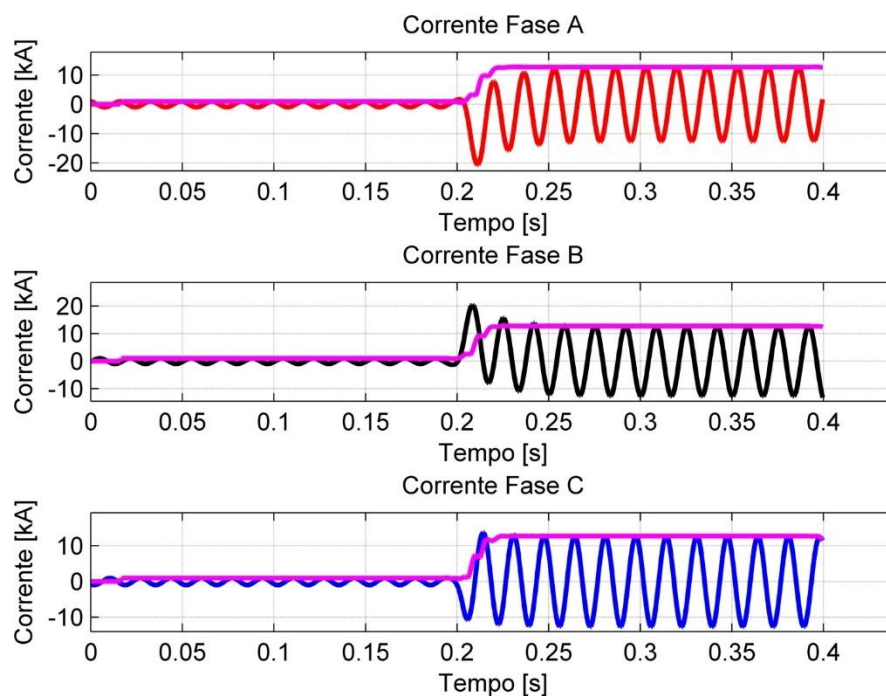


Figura 4.18 – Módulos estimados das correntes para o caso de um curto-circuito simulado do tipo ABCT.

Com a estimação dos módulos dos sinais senoidais de tensão e corrente apresentados, resta mostrar os seus respectivos ângulos, para que o fasor esteja completo. A Figura 4.19 apresenta os ângulos estimados nas ondas de tensão, enquanto a Figura 4.20 mostra os ângulos estimados para as ondas de corrente. Opta-se por apresentar todos os ângulos na escala de graus e assim como na estimação do módulo, o primeiro valor de ângulo só surge quando uma janela de amostras estiver completa. Também ocorrem as oscilações da estimação no momento em que se inicia o transitório, devido aos mesmos motivos explicados anteriormente.

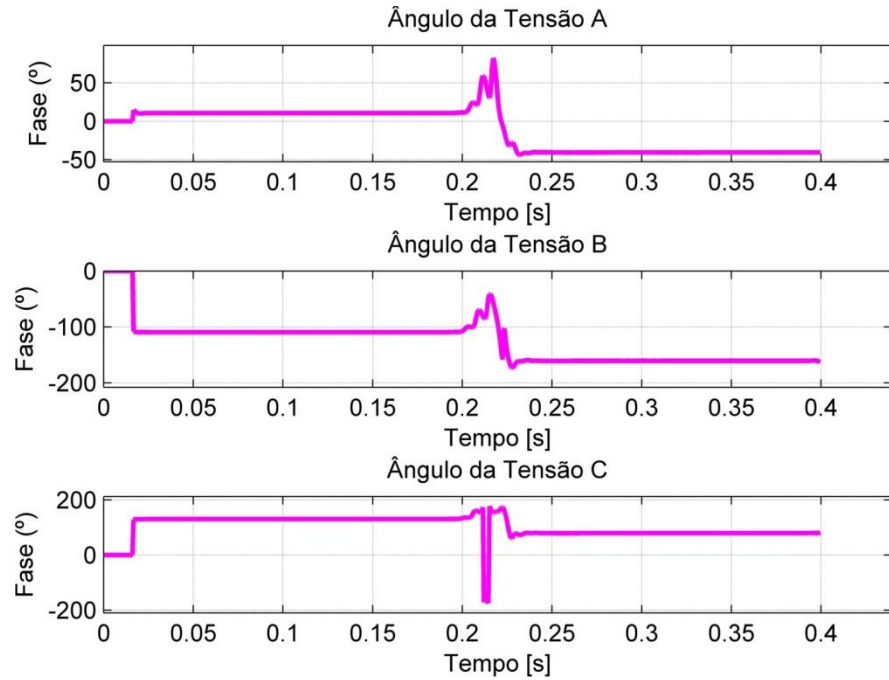


Figura 4.19 – Ângulos estimados das tensões para o caso de um curto-circuito simulado do tipo ABCT.

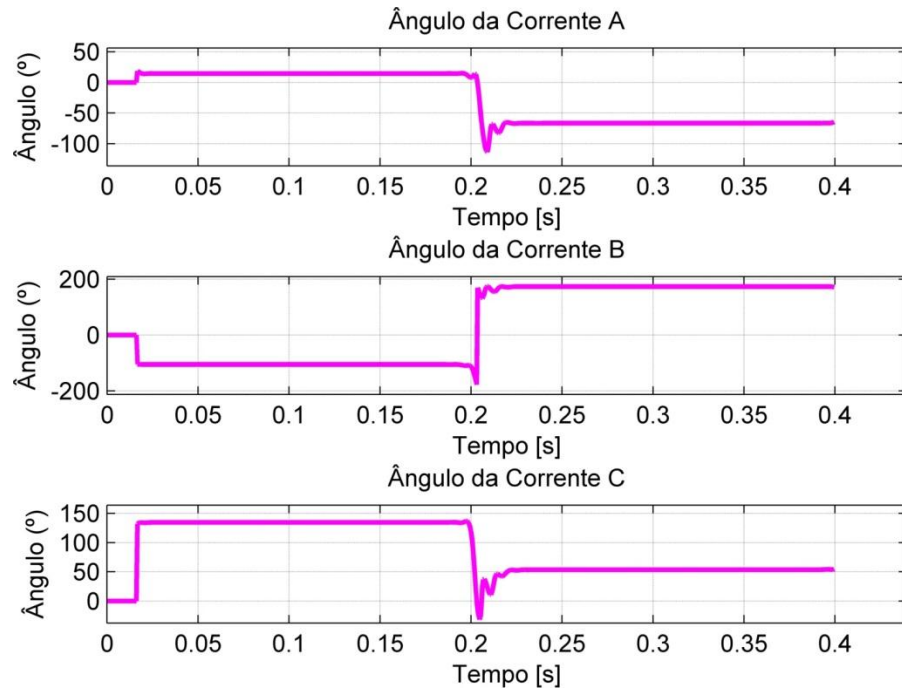


Figura 4.20 – Ângulos estimados das correntes para o caso de um curto-circuito simulado do tipo ABCT.

Enquanto os módulos são praticamente iguais em todo período que antecede o transitório (pré-falta), os ângulos possuem valores diferentes para cada fase analisada, tanto nas correntes quanto nas tensões. A explicação é que em sistemas

trifásicos equilibrados e simétricos, os ângulos de cada fase estão espaçados um do outro por um ângulo de 120 graus, conforme mostra a Equação (46) [28]:

$$\theta_c = \frac{2\pi}{k} = \frac{2\pi}{3} = 120^\circ \quad (46)$$

onde k é o número de fases do sistema e θ_c é o ângulo característico. Desta forma, os ângulos entre cada fase de tensão ou corrente no período anterior ao da falta (instante 0 até 0,2 segundo), devem ter um espaçamento aproximado de θ_c , evidenciando a simetria do sistema.

A Tabela 4.2 apresenta os valores médios dos ângulos estimados nas fases de tensão e corrente no momento anterior ao início do transitório, que são os mesmos mostrados no formato gráfico pela Figura 4.19. Percebe-se que estes ângulos estão espaçados corretamente pelo ângulo característico θ_c e que o fasor gira no sentido anti-horário. A fase A da tensão tem um ângulo de 10° , que é espaçado exatamente 120° da fase B (-110°) no sentido anti-horário, que por sua vez também se espaça de 120° da fase C (130° ou -230°).

A Tabela 4.3 apresenta os valores médios dos ângulos estimados nas fases da corrente, como mostra de forma gráfica a Figura 4.20. Há também um espaçamento de 120° entre as fases, assim como ocorre com a tensão, já que a carga é equilibrada e simétrica. A fase A apresenta um ângulo de 15° no período pré-falta, 120° após a fase A aparece a fase B (-105°) e por último a fase C (135° ou -225°), lembrando que o giro permanece no sentido anti-horário.

Tabela 4.2– Ângulos estimados para as fases de tensão no período anterior ao curto-circuito simulado do tipo ABCT.

Fase	Ângulo (°)
A	10
B	-110
C	130

Tabela 4.3– Ângulos estimados para as fases de correntes no período anterior ao curto-circuito simulado do tipo ABCT.

Fase	Ângulo (°)
A	15
B	-105
C	135

4.3.2 Falta AB simulada no ATP

O segundo caso analisado trata-se de um curto-circuito entre as fases A e B, sem a presença da terra. A falta ocorreu à jusante (à frente) do relé, dentro de sua zona de proteção, a uma distância de aproximadamente 5 km de linha de transmissão. A Figura 4.21 apresenta o diagrama da simulação de falta AB criada no programa ATP. Observa-se pelo circuito simulado, que desta vez não houve ligação da terra no circuito que chaveia a falta.

A Figura 4.22 apresenta a corrente do circuito trifásico, onde novamente o curto-circuito foi iniciado no tempo de 0,2 segundo e a simulação durou 0,4 segundo. Neste instante, a amplitude das fases A e B aumentam consideravelmente, devido a falta que as atinge.

A Figura 4.23 e Figura 4.24 apresentam as tensões e correntes, respectivamente, de cada uma das fases separadas. A fase C em nenhum dos dois casos sofre alteração, já que o curto-circuito não atinge esta fase.

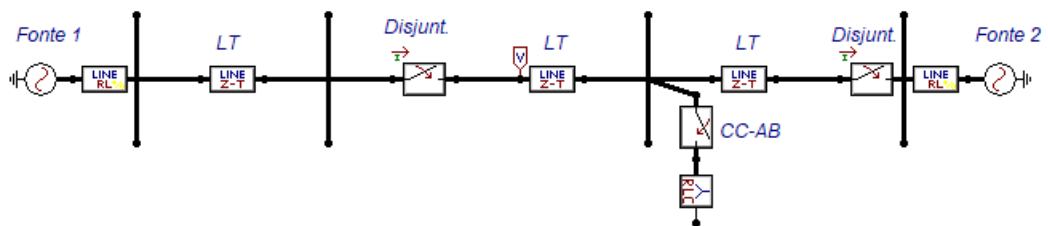


Figura 4.21 – Diagrama da falta bifásica (AB) simulado no programa ATPDraw.

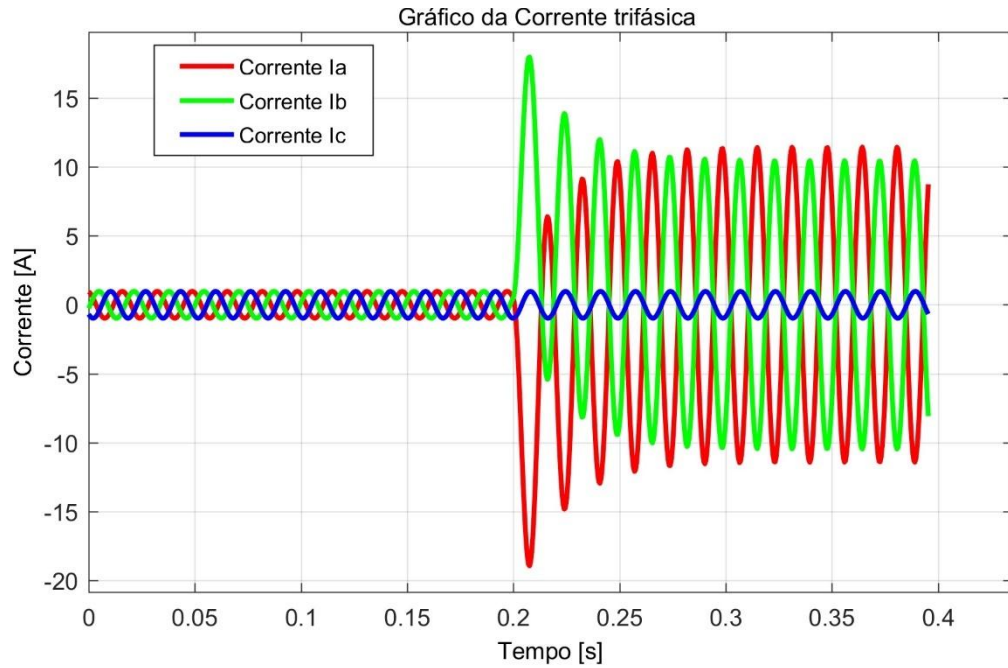


Figura 4.22 – Corrente trifásica para a falta AB simulada no programa *ATPDraw*.

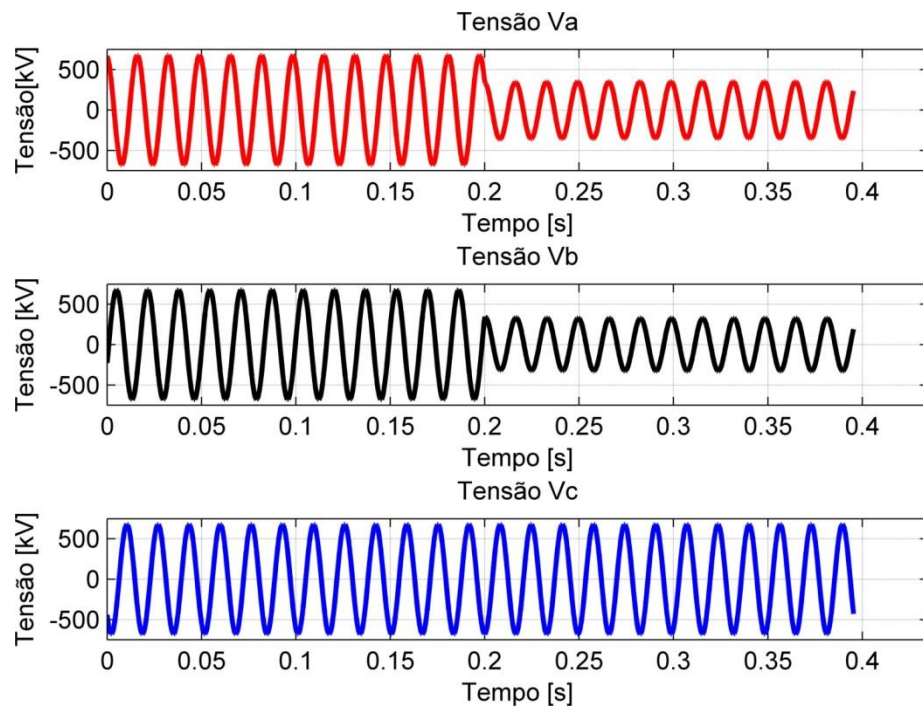


Figura 4.23 – Sinal trifásico das tensões com cada uma das fases separadas (falta AB).

Na Figura 4.25 e Figura 4.26 tem-se a identificação de transitório nas ondas de tensão e corrente, respectivamente. A detecção automática do transitório opera corretamente para as fases A e B que foram afetadas pela falta. Na fase C, onde

não ocorre nenhuma falta, o algoritmo não identifica nenhuma alteração e assim não há qualquer tipo de ação.

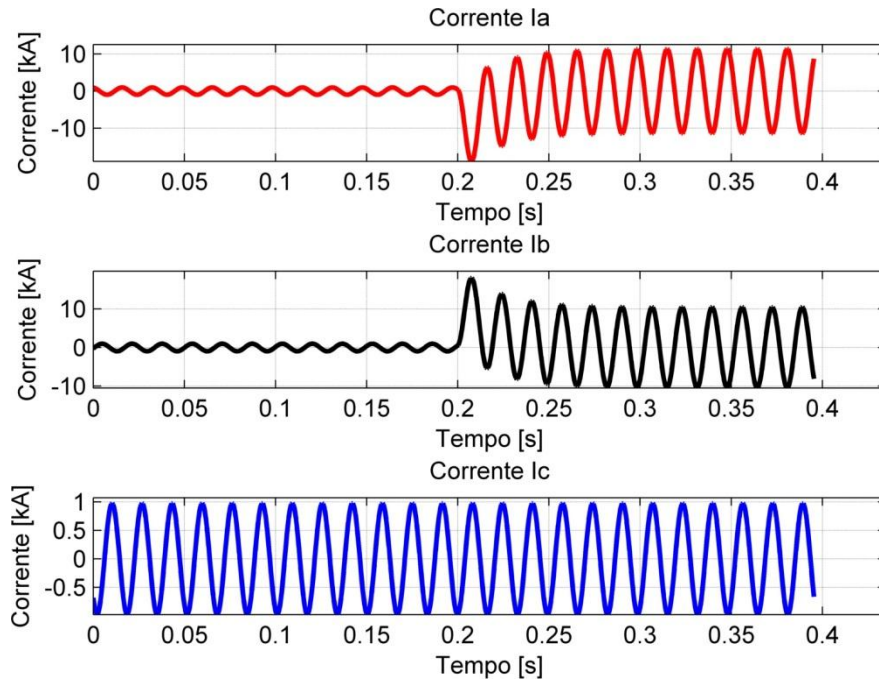


Figura 4.24 – Sinal trifásico das correntes com cada uma das fases separadas (falta AB).

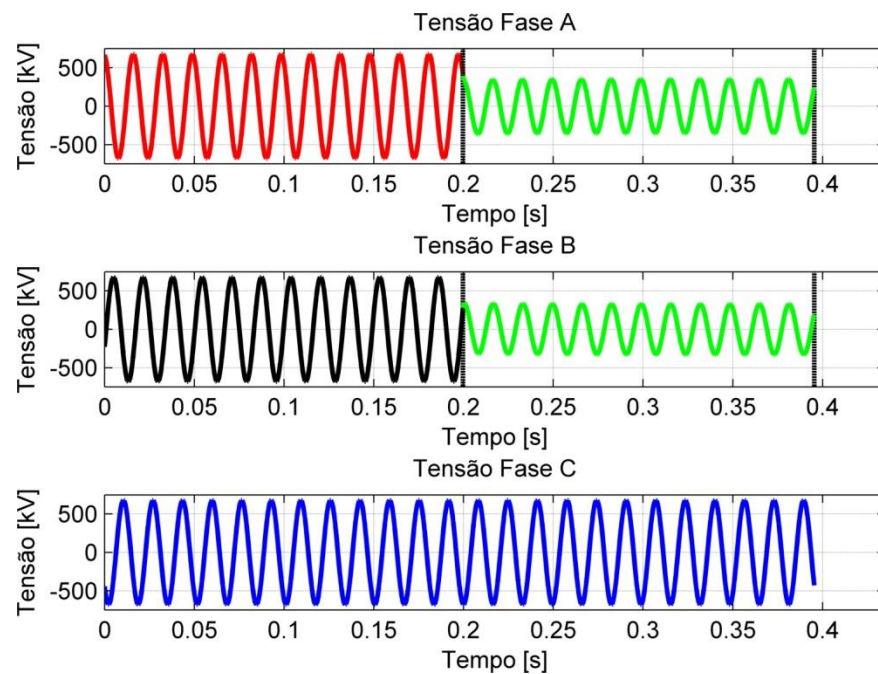


Figura 4.25 – Identificação do transitório nas ondas de tensão de um curto-circuito simulado do tipo AB.

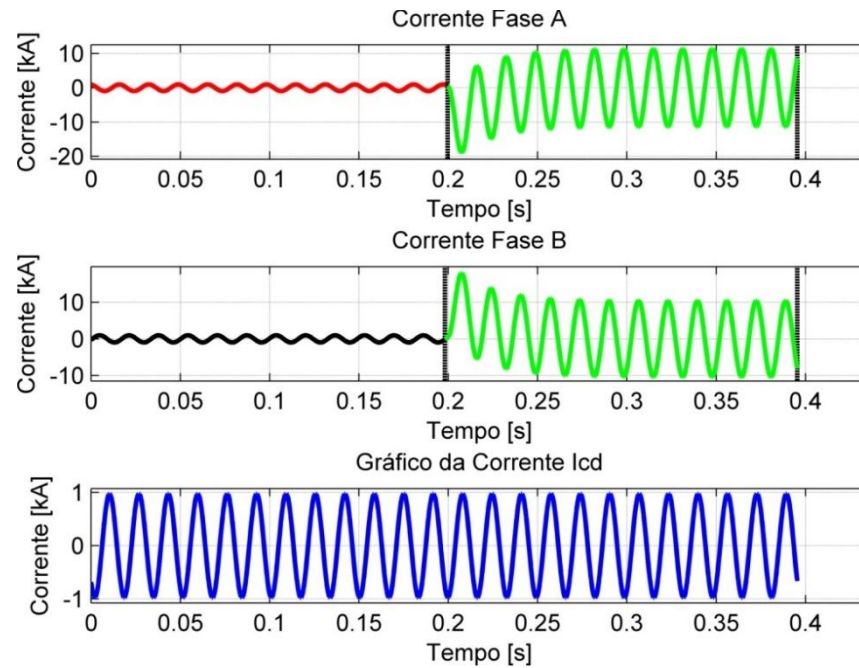


Figura 4.26 – Identificação do transitório nas ondas de corrente de um curto-circuito simulado do tipo AB.

Os módulos da estimação fasorial das correntes e tensões são apresentados na Figura 4.27 e Figura 4.28. A partir do instante 0,2 segundo, a estimação de módulo oscila novamente nas fases A e B, que sofrem com o efeito do curto-circuito. Na fase C o módulo permanece praticamente constante em todos os períodos do sinal.

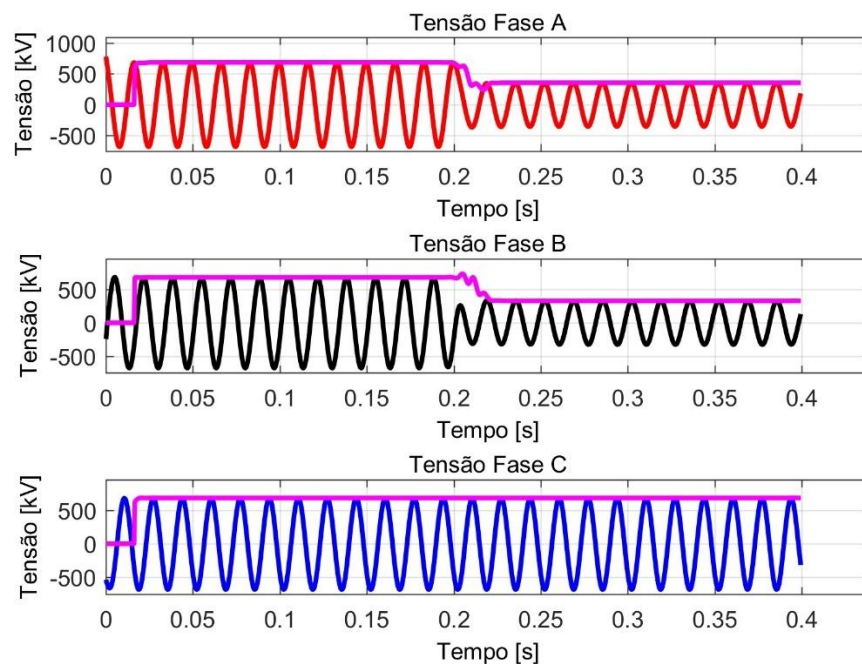


Figura 4.27– Módulos estimados das tensões para o caso de um curto-circuito simulado do tipo AB.

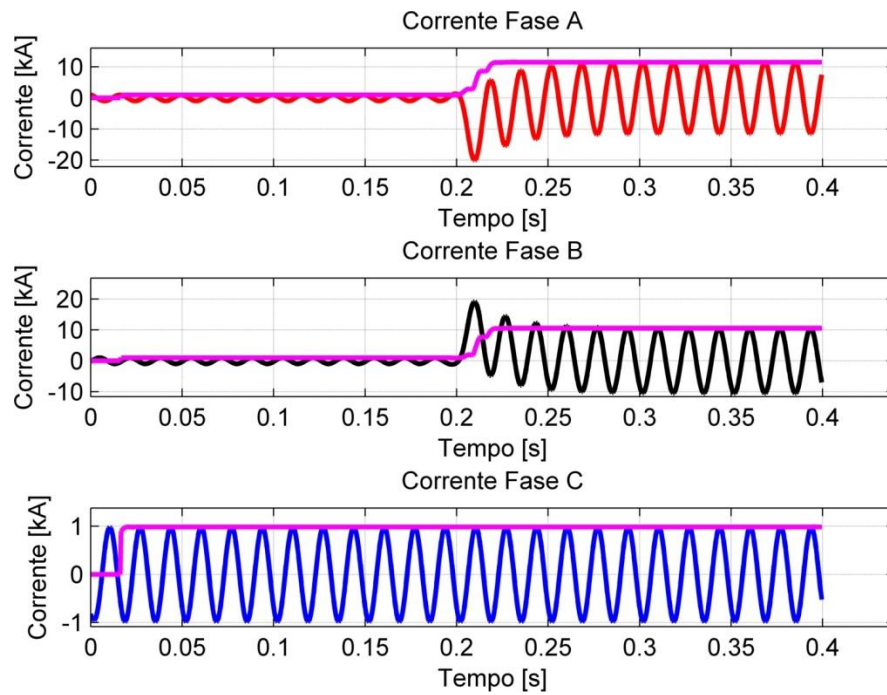


Figura 4.28 – Módulos estimados das correntes para o caso de um curto-circuito simulado do tipo AB.

Os ângulos estimados das tensões são apresentados na Figura 4.29, enquanto a Figura 4.30 mostra os ângulos estimados das correntes.

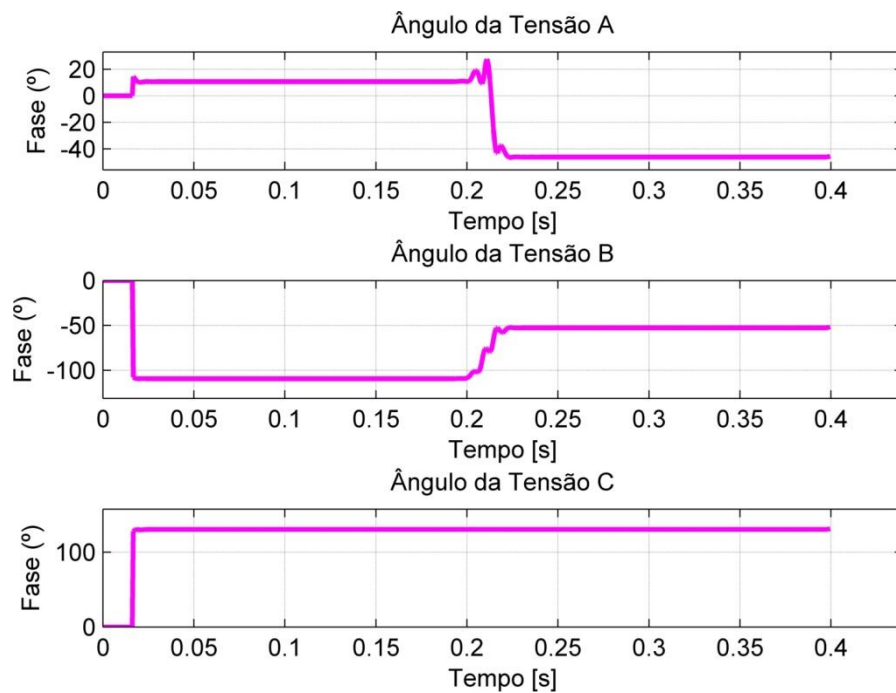


Figura 4.29 – Ângulos estimados das tensões para o caso de um curto-circuito simulado do tipo ABCT.

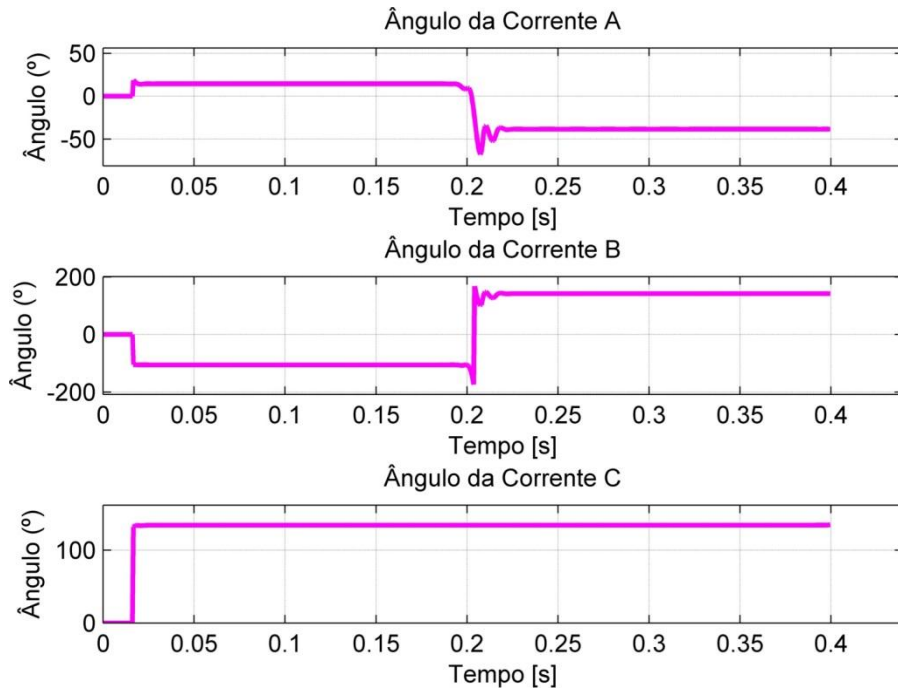


Figura 4.30 – Ângulo estimado das correntes para o caso de um curto-circuito simulado do tipo AB.

Os valores dos ângulos médios estimados para tensão e corrente no período pré-falta são apresentados na Tabela 4.4 e Tabela 4.5, respectivamente. Antes da falta, os ângulos indicam que o sistema está simétrico, já que as fases, tanto da tensão quanto da corrente, são espaçadas pelo ângulo característico de 120° . Após o transitório, a estimação dos ângulos oscila por alguns instantes até se estabilizar. As fases A e B assumem novos valores após a falta e não existe mais diferença de 120° observada no período pré-falta, já que o curto-circuito insere uma assimetria no sistema.

Tabela 4.4– Ângulos estimados para as fases de tensão no período anterior ao curto-circuito simulado do tipo AB.

Fase	Ângulo ($^\circ$)
A	10
B	-110
C	130

Tabela 4.5– Ângulos estimados para as fases de correntes no período anterior ao curto-circuito simulado do tipo AB.

Fase	Ângulo (°)
A	15
B	-105
C	135

Capítulo 5

APLICAÇÃO DA ROTINA COMPUTACIONAL PARA AVALIAÇÕES DOS CASOS DE INTERESSE PRÁTICO

5.1 Introdução

Neste capítulo, apresenta-se a aplicação da rotina computacional em alguns casos de interesse prático. A efetividade do algoritmo é testada na análise de eventos contendo transitórios do tipo curto-circuito. São apresentados os casos, logo em seguida é mostrada a identificação do transitório, as estimações fasoriais, as unidades de proteção de distância para caracterização do tipo de falta e o relatório gerado com as principais características de cada período do evento.

Apesar da realização de testes preliminares em sinais simulados no capítulo anterior, a rotina computacional tem como prioridade a análise de sinais reais provenientes de LTs.

5.2 Oscilografias analisadas para avaliação da rotina computacional

Para estudo do desempenho da rotina computacional de detecção e análise de transitórios baseado no filtro proposto no capítulo 3, avaliaram-se alguns casos reais, provenientes de oscilografias de RDPs e relés de proteção de linhas de transmissão em operação no Brasil.

5.2.1 Apresentação dos casos reais de transitórios

O primeiro caso é um curto-circuito da fase C para terra (CT), ocorrido em uma LT de 500 kV. A Figura 5.1 apresenta as formas de ondas das três fases de tensão, enquanto a Figura 5.2 mostra as fases de corrente. As duas figuras apresentam as curvas nos mesmos instantes de tempo e as fases A, B e C são apresentadas nas cores vermelha, preta e azul, respectivamente.

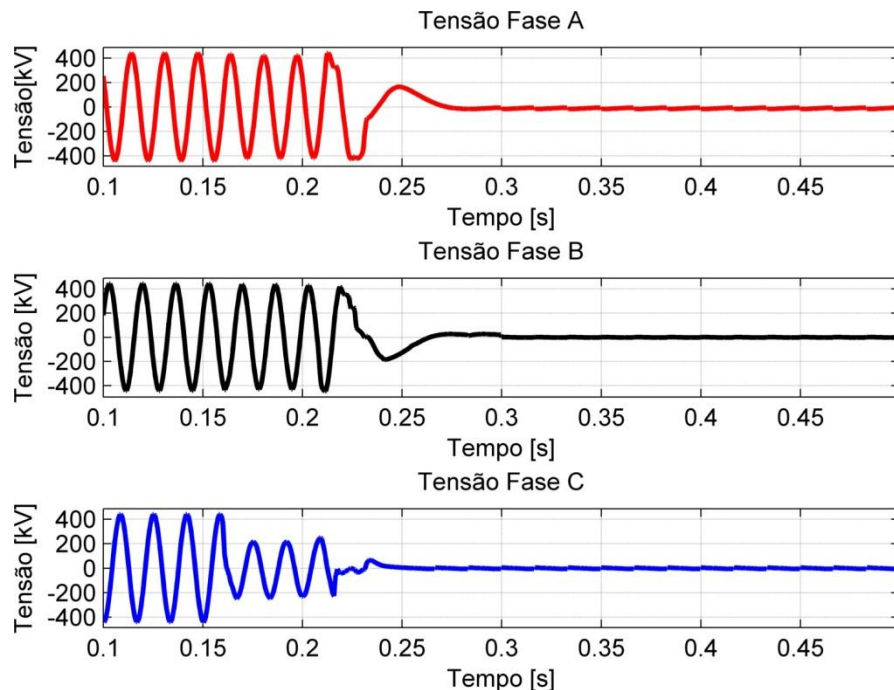


Figura 5.1 – Ondas de tensão com presença de falta para uma LT de 500 kV.

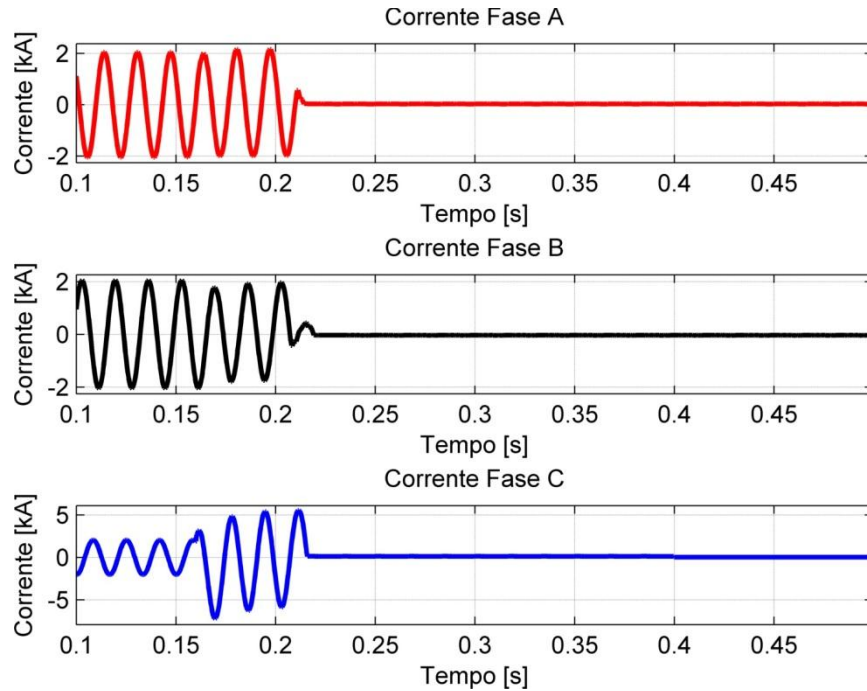


Figura 5.2 – Ondas de corrente com presença de falta para uma LT de 500 kV.

O segundo caso também é um evento curto-circuito, que corresponde a uma falta da fase A para terra (AT) de uma LT trifásica de 345 kV. A Figura 5.3 e Figura 5.4 apresentam as formas de ondas das 3 fases de tensão e corrente, respectivamente.

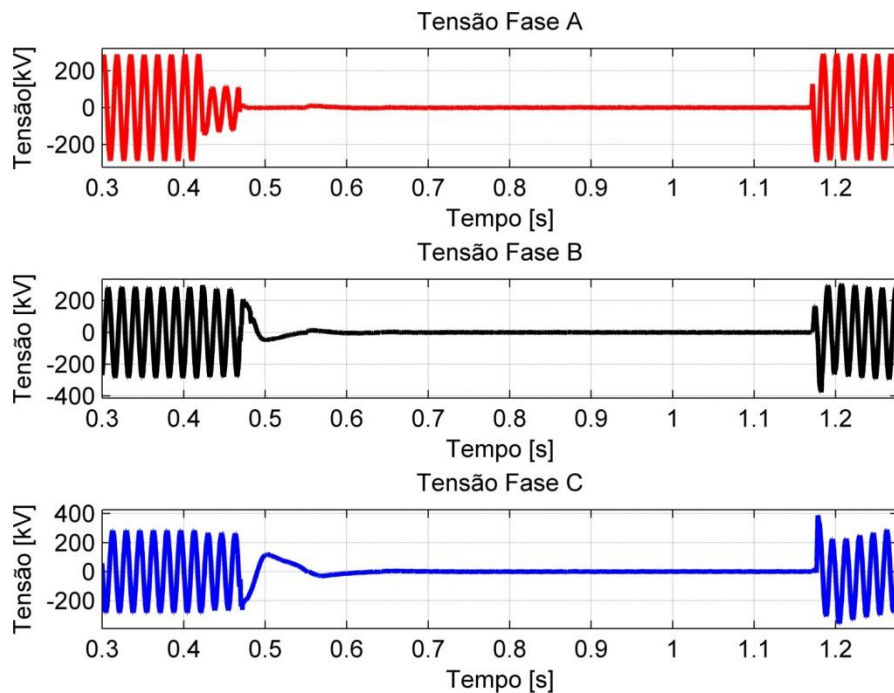


Figura 5.3 – Ondas de tensão com presença de falta para uma LT de 345 kV.

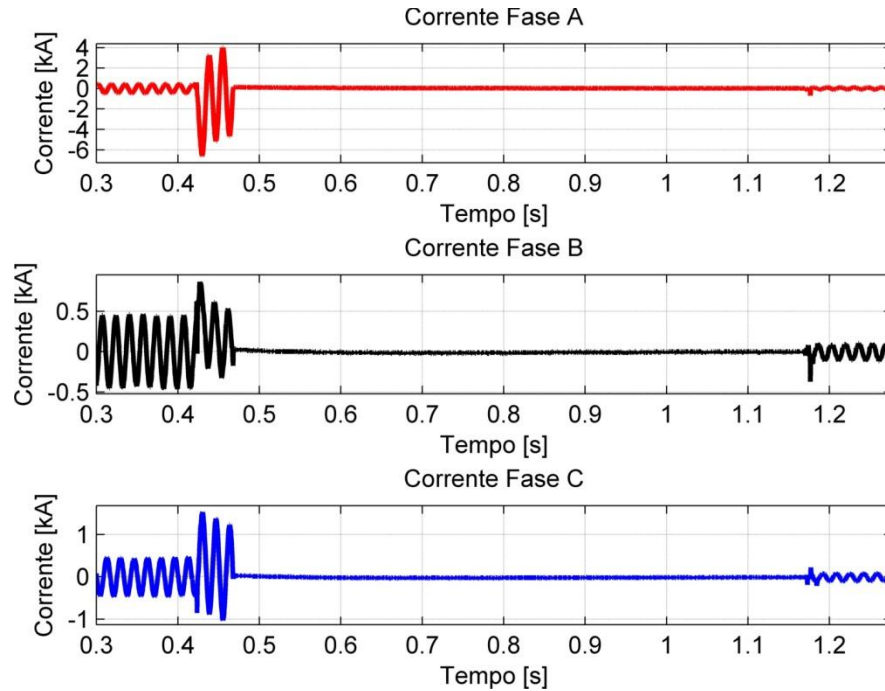


Figura 5.4 – Ondas de corrente com presença de falta para uma LT de 345 kV.

O último caso apresentado refere-se a um transitório ocorrido em uma LT de 138 kV que sofre uma oscilação nos sinais de tensão e corrente. A Figura 5.5 e Figura 5.6 apresentam as formas de ondas das tensões e correntes para este transitório.

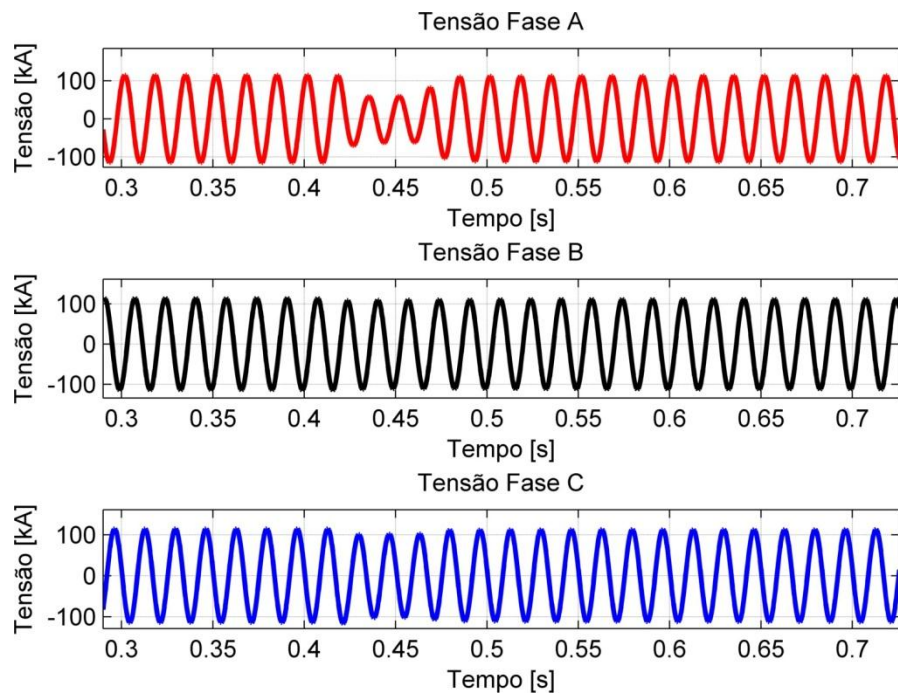


Figura 5.5– Ondas de tensão com presença de transitório para uma LT de 138 kV.

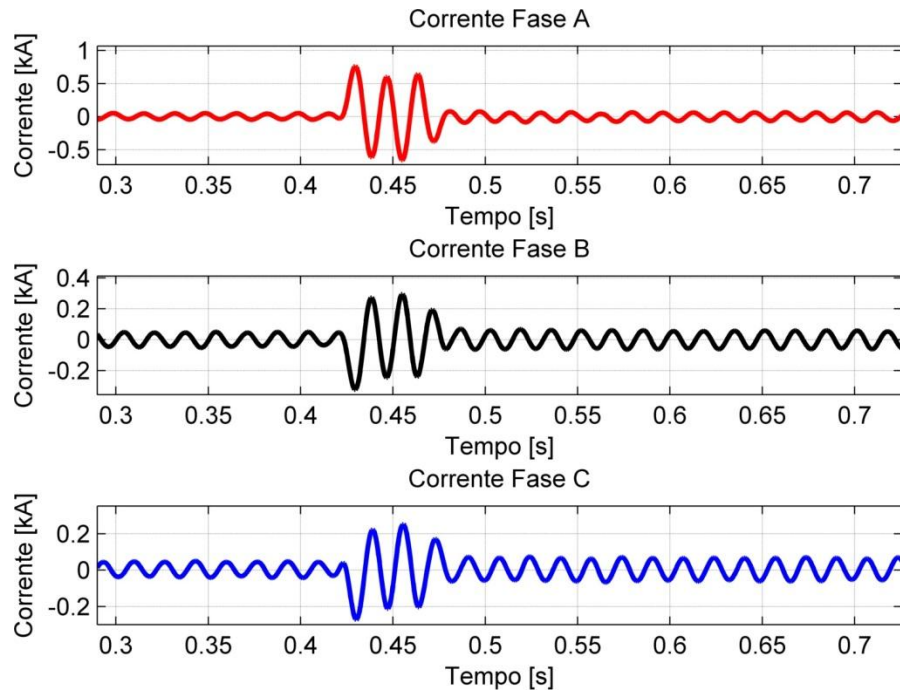


Figura 5.6– Ondas de corrente com presença de transitório para uma LT de 138 kV.

Diferentemente dos dois primeiros casos, neste não há a presença de falta e sim a ocorrência de subtensão e sobrecorrente em algumas fases, causadas por uma falta em uma linha de transmissão de barramento próximo. O curto-circuito AT na LT de 345 kV, apresentado no caso anterior a este, é o responsável pela presença das oscilações neste terceiro caso. Nota-se que, em ambos os casos, o instante de início do transitório é o mesmo.

5.2.2 Resultados dos casos reais de transitórios

Este tópico mostra os resultados e os comentários a respeito dos três casos apresentados anteriormente, seguindo a mesma ordem de exibição.

A Figura 5.7 e Figura 5.8, exibem as ondas resultantes do curto-circuito da LT trifásica de 500 kV, já com a identificação do período transitório, demarcado pela região em verde entre retas horizontais. A falta dura cerca de 3 ciclos, até ser extinta pela atuação do disjuntor, que recebe o comando do relé de proteção para abrir o circuito. Tanto as tensões quanto as correntes caem para valores próximos a zero quando o circuito é aberto.

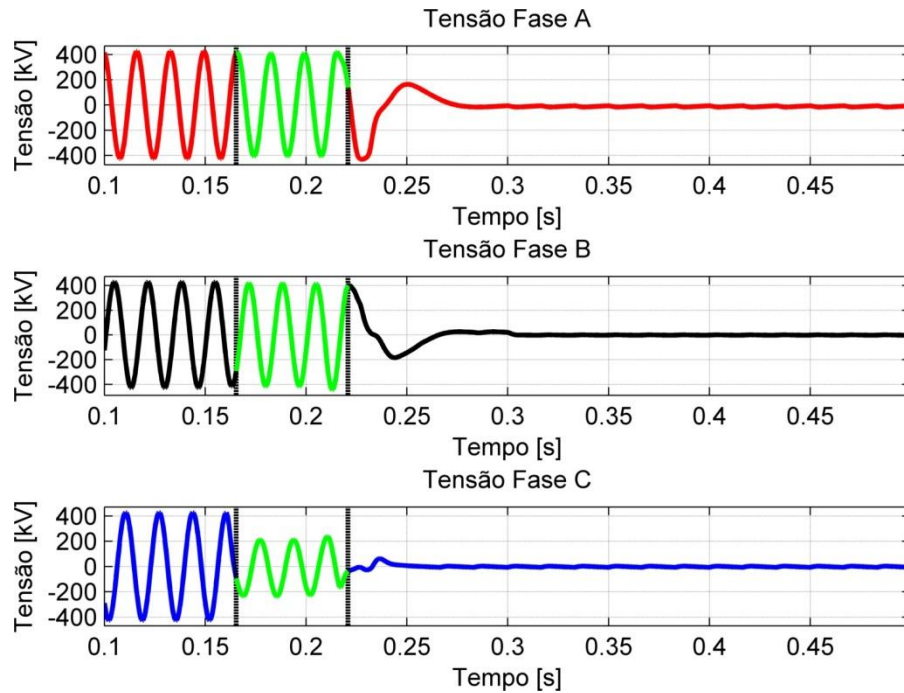


Figura 5.7 – Identificação do transitório nas ondas de tensão para um curto-circuito CT presente em uma LT de 500 kV.

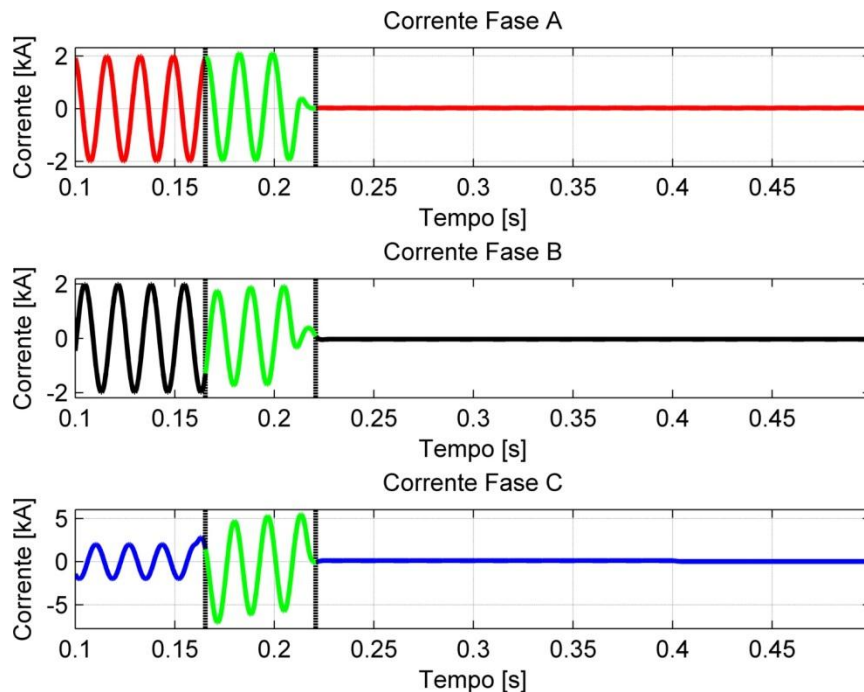


Figura 5.8 – Identificação do transitório nas ondas de corrente para um curto-circuito CT presente em uma LT de 500 kV.

A Figura 5.9 e Figura 5.10 mostram as ondas de corrente e tensão analisadas juntamente com os seus módulos, provenientes da estimação fasorial.

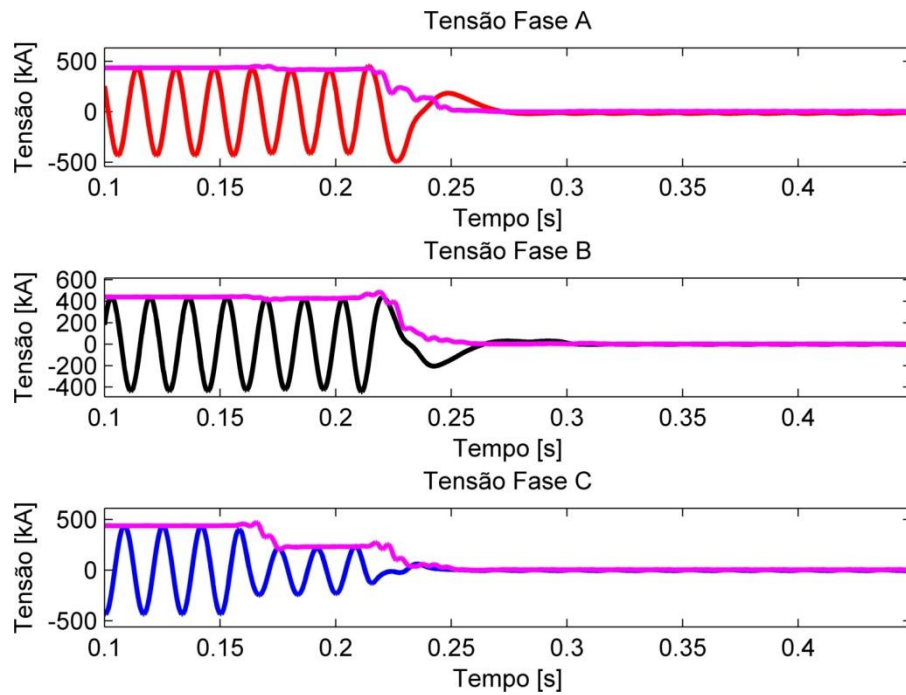


Figura 5.9 – Estimação fasorial nos sinais de tensão de um curto-circuito real CT.

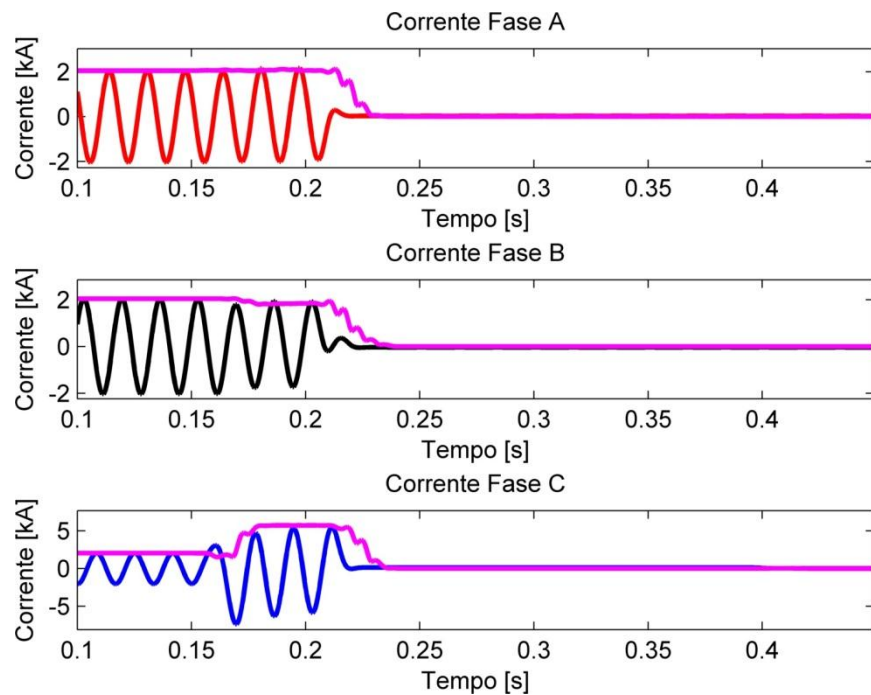


Figura 5.10 – Estimação fasorial nos sinais de corrente de um curto-circuito real CT.

A partir da identificação das posições de início e fim de transitório, mais a estimação fasorial e alguns dados da LT presentes no arquivo de entrada, pode-se montar um relatório sobre o evento, que facilita a interpretação dos dados

analisados. No Quadro 5.1, tem-se a primeira parte do relatório que traz as principais informações sobre a LT e o evento transitório registrado:

Quadro 5.1 - Dados gerais da LT de 500 kV

Dados da Linha:LT [REDACTED] - 500 kV
Data: 17/10/2003 Hora: 19:22:25
Tipo de RDP: MALC001
Frequência da rede = 60 Hz
Tensão nominal = 500 kV
Comprimento da Linha (LT) = 105.58 km
Resistência de seq. positiva = 0.024 ohm/km
Resistência de seq. zero = 0.349 ohm/km
Reatância de seq. positiva = 0.357 ohm/km
Reatância de seq. zero = 1.313 ohm/km
Impedância de surto estimada: Entre 275 e 282 ohms
SIL da linha estimado: Entre 886 e 910 MW

O relatório mostra que a LT possui 105,58 km, se tratando de uma linha média (entre 80 km e 240 km), e a impedância característica estimada, juntamente com o SIL estimado estão dentro da faixa estabelecida para um nível de tensão de 500 kV, como pode ser visto na Tabela 4.1 apresentada no capítulo 4.

A segunda parte do relatório apresenta os dados mais relevantes dos sinais na LT no momento de pré-falta, como pode ser visto no Quadro 5.2. Os fasores de tensão e corrente de cada fase são apresentados em *pu* (por unidade), sistema comumente utilizado para expressar grandezas elétricas em SEP. Os valores de módulo da tensão nas três fases estão próximos de 1 pu, que é o valor esperado para o funcionamento em RPS do sistema, já os módulos de corrente apresentam valores acima da unidade pu, o que indica que o sistema está com uma sobrecarga. A diferença angular entre uma fase e outra, tanto nas tensões quanto nas correntes, é de aproximadamente 120°, evidenciando a simetria do sistema e confirmando o que era esperado para o período de pré-falta.

A seguir apresenta-se os dados do relatório a respeito do período pré-falta:

Quadro 5.2 - Dados do período de pré-falta da LT de 500 kV

Dados do Período de Pré-Falta:

Início do período: 0.00 ms

Fim do período: 166.67 ms

Duração: 166.67 ms

Va = 1.07 << 54.36° pu

Vb = 1.08 << -65.72° pu

Vc = 1.07 << 173.96° pu

Ia = 1.42 << 57.15° pu

Ib = 1.41 << -62.15° pu

Ic = 1.42 << 177.21° pu

Potência Aparente na LT (S): 1340 MVA

Fator de potência na LT: 0.99

A LT está com carga pesada de 1.49*SIL

São apresentados, na escala de milissegundos, os tempos de início, término e duração do período de pré-falta. A potência aparente na LT é de 1340 MVA e esta opera com uma carga considerada pesada, que corresponde a 1,49 * SIL, utilizando como o SIL de referência a média entre os valores de SIL estimado da linha, que foram apresentados na primeira parte do relatório. Para considerar a carga como pesada cria-se um critério onde a potência da LT no período de pré-falta, que é comparado ao valor do SIL de referência da LT (média entre os valores do SIL estimado), como pode ser visto pela Figura 5.11. As cargas com uma potência acima de 1,2 * SIL são consideradas pesadas.

Critérios de Carga

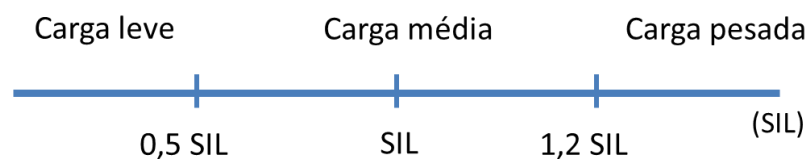


Figura 5.11– Critérios de classificação de carga na LT no período de pré-falta.

LTs menores que 120 km têm mostrado na prática que podem operar com uma carga de até duas vezes o SIL, sendo limitada à capacidade de condução de corrente dos seus cabos, o que explica a operação desta LT.

A terceira parte do relatório exhibe dados relativos ao período de transitório, onde novamente são apresentados os valores dos fasores de tensão e corrente para cada fase, os tempos de início, fim e duração do transitório, dentre outras informações, conforme mostrado a seguir:

Quadro 5.3 - Dados do período de falta da LT de 500 kV

 Dados do Período de Falta (Transitório):

Início do período: 166.67 ms

Fim do período: 220.83 ms

Duração: 54.17 ms

$V_a = 1.03 \ll 58.49^\circ$ pu

$V_b = 1.06 \ll -67.41^\circ$ pu

$V_c = 0.57 \ll 174.19^\circ$ pu

$I_a = 1.42 \ll 61.72^\circ$ pu

$I_b = 1.27 \ll -60.66^\circ$ pu

$I_c = 3.96 \ll 114.70^\circ$ pu

Análise de cada fase de tensão e corrente
 no transitório:

Tensão normal na fase A de $1.03 \cdot V_{nom}$

Tensão normal na fase B de $1.06 \cdot V_{nom}$

Subtensão elevada na fase C de $0.57 \cdot V_{nom}$

Sobrecorrente leve na fase A de $1.42 \cdot I_{nom}$

Corrente normal na fase B de $1.27 \cdot I_{nom}$

Sobrecorrente elevada na fase C de $3.96 \cdot I_{nom}$

Houve falta do tipo: CT

Além da apresentação dos fasores, alguns critérios foram criados para classificar as tensões e correntes de acordo com os valores dos seus módulos em pu. O item do relatório acima denominado "Análise de cada fase de tensão e

corrente no transitório” apresenta estas classificações, que basicamente comparam os valores das tensões e correntes no período de transitório com os seus valores nominais, que no caso da corrente é o valor calculado a partir da tensão de base e potência de base (SIL).

A Figura 5.12 apresenta os critérios utilizados para classificação dos valores de tensão e corrente durante o período de transitório. É considerado uma subtensão, como indicado na Figura 5.12a, a tensão que apresente um valor menor que $0,7 * V_{nom}$ (tensão nominal), uma subtensão leve está entre $0,7 * V_{nom}$ e $0,9 * V_{nom}$, a tensão normal está entre $0,9 * V_{nom}$ e $1,1 * V_{nom}$, a sobretensão leve está entre $1,1 * V_{nom}$ e $1,3 * V_{nom}$ e por fim a sobretensão elevada que está a partir de $1,3 * V_{nom}$. A corrente possui as mesmas classificações, porém com pequenas alterações nos valores que são comparados a I_{nom} (corrente nominal), conforme pode ser visto na Figura 5.12b.

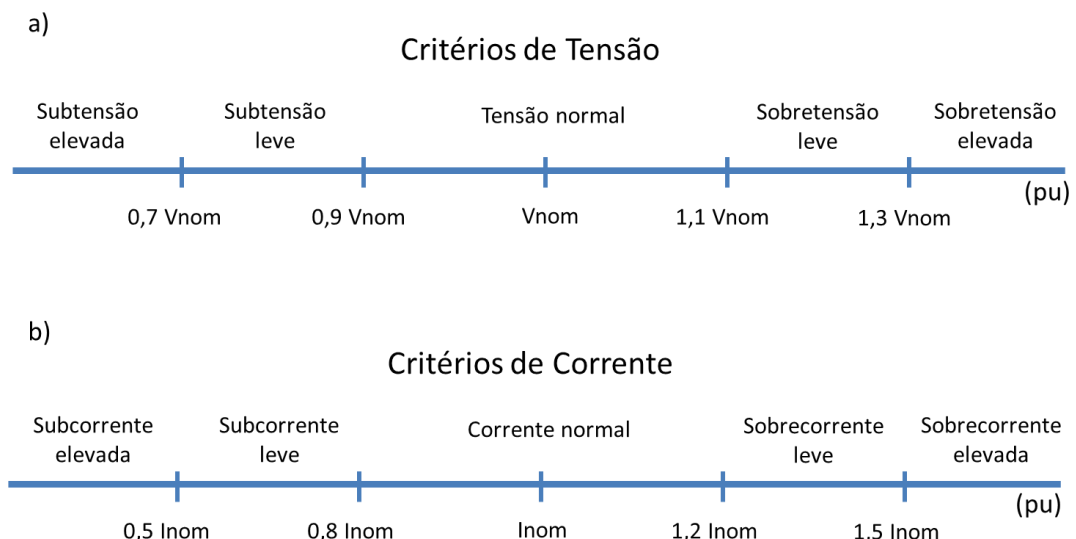


Figura 5.12 – Critérios de classificação da tensão e corrente durante o transitório.

Para o caso analisado, percebe-se pelo relatório no período de transitório que há ocorrências na fase C, já que esta apresenta subtensão e sobrecorrente elevada. O módulo da corrente aumenta em quase três vezes no período de transitório comparado ao período de pré-falta e mais de três vezes se comparado a corrente nominal, o que supõe que pode ter ocorrido um curto-circuito. Para confirmar esta suposição, cria-se no *software Matlab* um algoritmo que simula um relé de distância a partir de seis unidades de proteção do tipo mho, que são capazes de identificar faltas que ocorram em LTs.

Para criação do algoritmo de um relé de distância de uma LT de circuito único utiliza-se algumas grandezas de entrada para que se possa identificar cada tipo de curto-circuito que ocorra na linha. Para que o algoritmo do relé enxergue a impedância na ocorrência de um dos tipos de faltas, deve-se inserir no programa as grandezas apresentadas na Tabela 5.1 [29], [30].

Tabela 5.1 – Seleção das grandezas de entrada para as unidades de relé de distância – Adaptado de [30].

Relé / Unidade	AT	BT	CT	AB	BC	CA
V_R	Va	Vb	Vc	Va- Vb	Vb -Vc	Vc -Va
I_R	Ia + k Ia0	Ib + k Ia0	Ic + k Ia0	Ia- Ib	Ib- Ic	Ic- Ia

Ademais das grandezas de entrada, precisa-se de uma unidade de proteção, onde entram as impedâncias e conseqüentemente são caracterizados os tipos de faltas. Para este trabalho escolheu-se a unidade de proteção MHO, que tem como característica um círculo que passa na origem, conforme mostra a Figura 5.13. Seu raio vale $Z_N/2$, onde Z_N é a impedância da linha vezes sua distância. A impedância Z_R é calculada a partir das grandezas de entradas apresentadas na Tabela 5.1. Para o ajuste da unidade MHO utiliza-se apenas uma zona de proteção, protegendo-se cem por cento da LT. É construída uma unidade MHO para cada tipo de falta, conforme mostra a Tabela 5.1. Essas seis unidades são capazes de detectar qualquer tipo de curto-circuito que venha a ocorrer na LT.

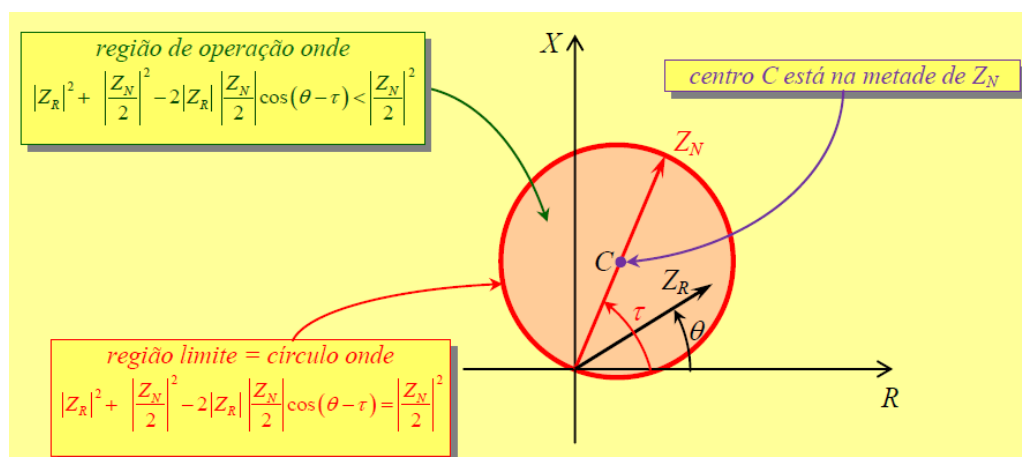


Figura 5.13– Característica de operação da unidade MHO [30].

As seis unidades para análise deste primeiro caso são apresentadas na Figura 5.14, onde cada ponto vermelho representa um valor de impedância calculado em cada instante de tempo. Quando estes pontos (impedâncias) entram em um dos círculos que representam as unidades de proteção, indica que existe um curto-circuito no evento em análise. Neste caso, a impedância entra na unidade CT, indicando que há uma falta da fase C para a terra. A unidade BC, ou falta da fase B para fase C, apresenta impedâncias próximas a sua circunferência mho, porém como não chega a entrar na unidade, não é caracterizada como um curto-circuito. Após a confirmação da falta utilizando esta unidade de proteção de distância, a informação é preenchida no relatório do período de falta, como visto no Quadro 5.3.

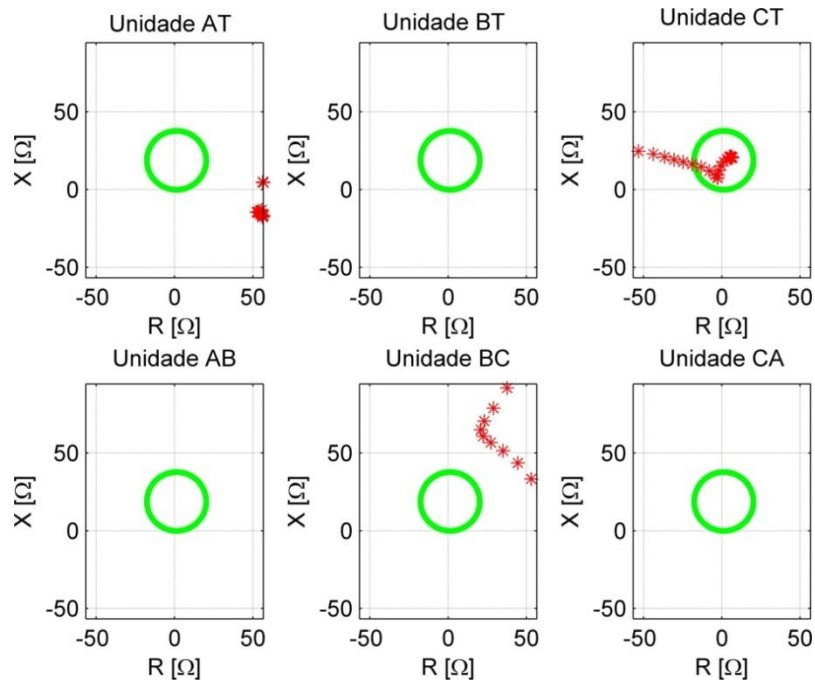


Figura 5.14 – Identificação de curto-circuito da fase C para terra.

Nos casos em que há a presença de um curto-circuito e posteriormente o religamento do sistema, o relatório informa dados a respeito do período em que o sistema permaneceu inoperante e também do período de religamento. Este primeiro caso analisado não contém estes períodos, desta forma passa-se a análise do próximo caso.

A análise do segundo caso inicia-se com a apresentação da Figura 5.15 e Figura 5.16, que mostram as ondas resultantes de um curto-circuito em uma LT trifásica de 345 kV, já com suas identificações de transitório. A falta dura por cerca

de 3 ciclos e é interrompida pela ação de abertura do disjuntor, que se mantém neste estado por cerca de 0,7 segundos, até que fecha-se o circuito e o sistema volta a operar normalmente, indicando a extinção da falta.

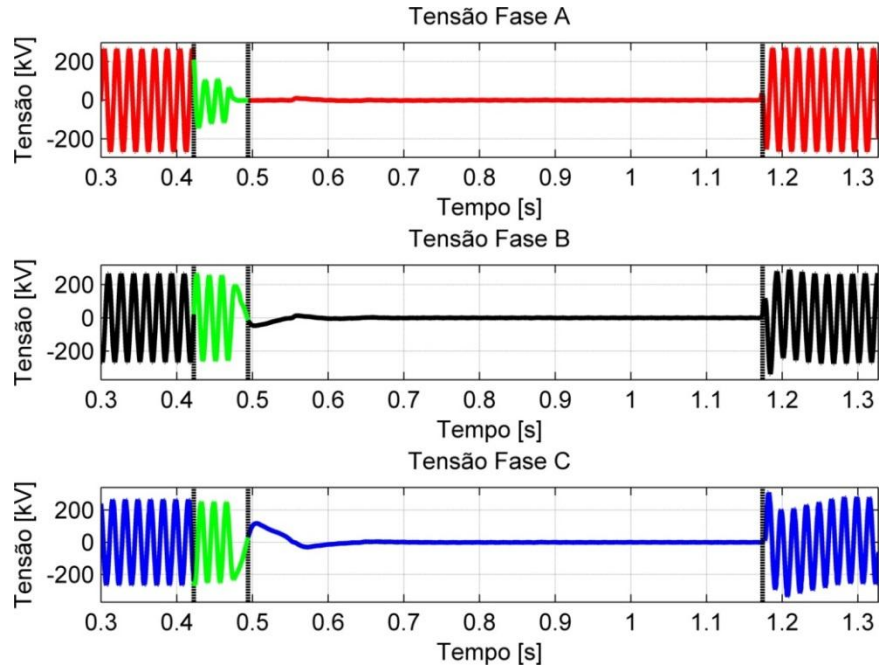


Figura 5.15 – Identificação do transitório nas ondas de tensão para um curto-circuito AT presente em uma LT de 345 kV

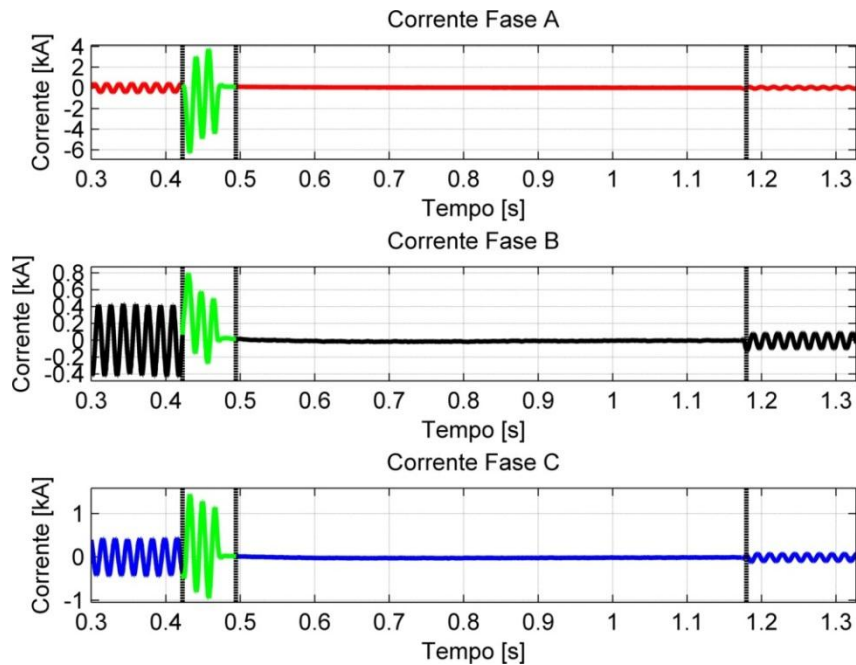


Figura 5.16 – Identificação do transitório nas ondas de corrente para um curto-circuito AT presente em uma LT de 345 kV.

A Figura 5.17 e Figura 5.18 mostram as ondas de corrente e tensão juntamente com os seus respectivos módulos dos fasores estimados.

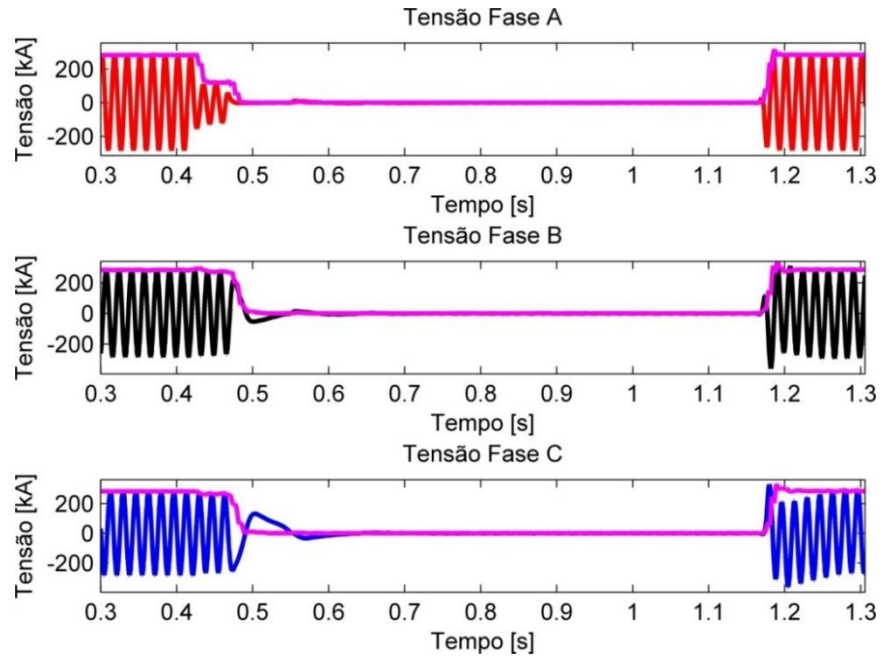


Figura 5.17 – Estimação fasorial nos sinais de tensão de um curto-circuito real AT.

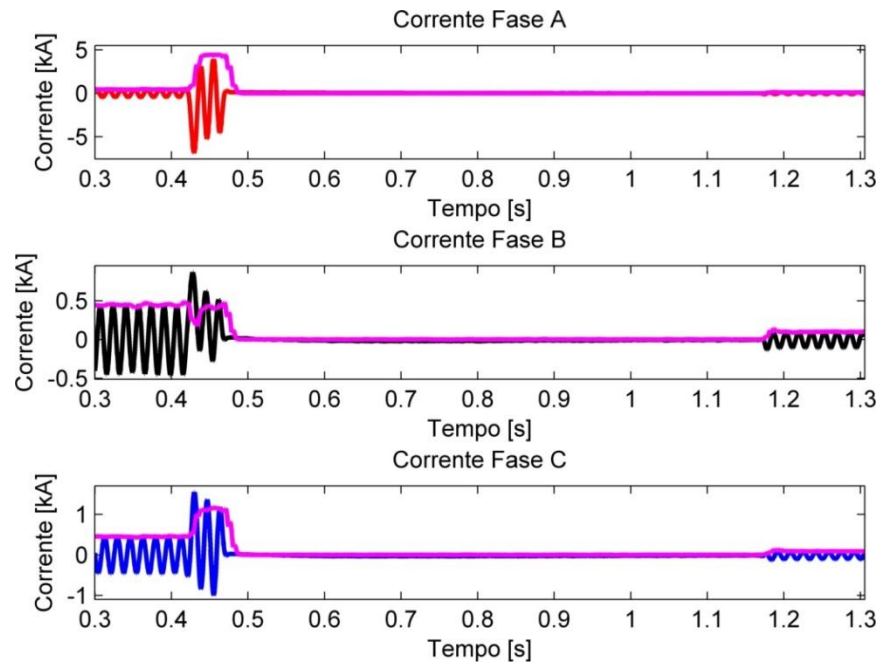


Figura 5.18 – Estimação fasorial nos sinais de corrente de um curto-circuito real AT.

Os principais dados do evento e da LT são apresentados no Quadro 5.4 a seguir.

Quadro 5.4 - Dados gerais da LT de 345 kV

Dados da Linha: LT - 345 kV
 Data: 21/12/2003 Hora: 19:03:49
 Tipo de RDP: MEHTA001
 Frequência da rede = 60 Hz
 Tensão nominal = 345 kV
 Comprimento da Linha (LT) = 74.40 km
 Resistência de seq. positiva = 0.036 ohm/km
 Resistência de seq. zero = 0.362 ohm/km
 Reatância de seq. positiva = 0.376 ohm/km
 Reatância de seq. zero = 1.433 ohm/km
 Impedância de surto estimada: Entre 289 e 297 ohms
 SIL da linha estimado: Entre 401 e 412 MW

A LT possui um comprimento de 74,4 km e é considerada uma linha curta (até 80 km), a impedância característica e o SIL estimados estão dentro da faixa estabelecida para uma LT de 345 kV, conforme indicado pela Tabela 4.1. Em seguida, o relatório apresenta os dados relativos ao período de pré-falta:

Quadro 5.5 - Dados do período de pré-falta da LT de 345 kV

Dados do Período de Pré-Falta:
 Início do período: 0.00 ms Fim do período: 420.83 ms
 Duração: 420.83 ms
 $V_a = 1.01 \ll -33.07^\circ$ pu
 $V_b = 1.01 \ll -156.27^\circ$ pu
 $V_c = 1.00 \ll 83.63^\circ$ pu
 $I_a = 0.46 \ll -34.88^\circ$ pu
 $I_b = 0.47 \ll -154.02^\circ$ pu
 $I_c = 0.48 \ll 84.23^\circ$ pu
 Potência Aparente na LT (S): 187 MVA
 A LT está com carga leve de $0.46 \cdot \text{SIL}$

Ambos os fasores de tensão e corrente apresentam valores que demonstram que o sistema está equilibrado e simétrico. Os módulos das correntes se encontram abaixo da unidade pu e a carga é caracterizada como leve a partir do critério da Figura 5.11, já que corresponde a $0,46 * SIL$.

O período de pré-falta dura até o tempo 420,83 ms, a partir daí inicia-se o período transitório, que tem suas informações divulgadas a seguir no Quadro 5.6:

Quadro 5.6 - Dados do período de falta da LT de 345 kV

 Dados do Período de Falta (Transitório):

Início do período: 420.83 ms

Fim do período: 484.38 ms

Duração: 63.54 ms

$V_a = 0.43 \ll -37.51^\circ pu$

$V_b = 0.97 \ll -152.39^\circ pu$

$V_c = 0.95 \ll 78.95^\circ pu$

$I_a = 4.66 \ll -105.85^\circ pu$

$I_b = 0.43 \ll 104.04^\circ pu$

$I_c = 1.21 \ll 68.86^\circ pu$

Análise de cada fase de tensão e corrente no transitório:

Subtensão elevada na fase A de $0.43 * V_{nom}$

Tensão normal na fase B de $0.97 * V_{nom}$

Tensão normal na fase C de $0.95 * V_{nom}$

Sobrecorrente elevada na fase A de $4.66 * I_{nom}$

Subcorrente elevada na fase B de $0.43 * I_{nom}$

Sobrecorrente leve na fase C de $1.21 * I_{nom}$

Houve falta do tipo: AT

Observando os fasores de tensão e corrente, nota-se que a fase A teve uma queda significativa na tensão e um aumento de dez vezes na corrente em relação ao período de pré-falta e de mais de 4 vezes em relação a corrente nominal, ocorrendo a subtensão e sobrecorrente, ambas elevadas. Houve alterações nas correntes das fases B e C também, porém não tão expressivas como na fase A.

Para analisar se há a presença de curto-circuito, utiliza-se novamente o algoritmo do relé de distância. A Figura 5.19 apresenta as unidades de proteção, que indicam uma falta AT, ou seja, uma falta da fase A para a terra. Apesar da unidade AB e unidade CA apresentarem impedâncias próximas às suas zonas de proteção, não é caracterizado o curto-circuito, já que nenhuma impedância entra nas unidades mho.

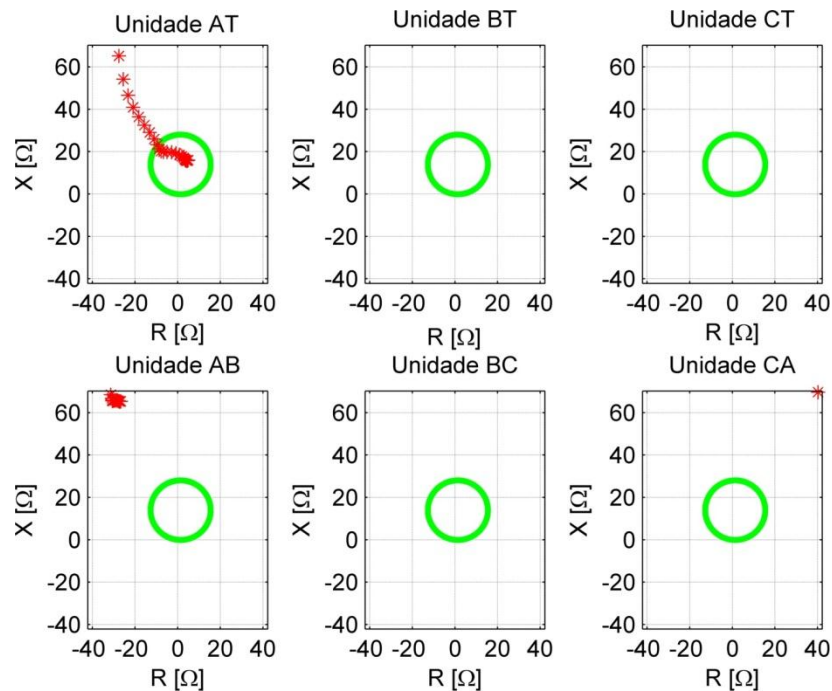


Figura 5.19 – Identificação de curto-circuito da fase A para terra.

Como há abertura do disjuntor, o relatório apresenta os dados do tempo em que o sistema permanece inoperante, como mostrado a seguir:

Quadro 5.7 - Dados do período de disjuntor aberto da LT de 345 kV

 Dados do Período de disjuntor aberto (tempo morto):

Início do período: 484.38 ms

Fim do período: 1177.08 ms

Duração: 692.71 ms

A maioria dos sinais apresentam uma tentativa de religamento do sistema, como neste caso. Após o período de disjuntor aberto, o sistema é religado e volta a

operar normalmente. Este período é denominado como restabelecimento do sistema e assim como os outros períodos, possui um relatório indicando as suas principais informações, como pode ser visto a seguir no Quadro 5.8:

Quadro 5.8 - Dados do período de restabelecimento do sistema da LT de 345 kV

Dados do Período de Restabelecimento do Sistema:

Início do período: 1177.08 ms

Fim do período: 1568.75 ms

Duração: 391.67 ms

$V_a = 1.02 \ll -32.52^\circ$ pu

$V_b = 1.01 \ll -155.73^\circ$ pu

$V_c = 1.01 \ll 84.01^\circ$ pu

$I_a = 0.10 \ll 61.66^\circ$ pu

$I_b = 0.11 \ll -63.75^\circ$ pu

$I_c = 0.10 \ll 172.00^\circ$ pu

A LT está com carga leve de $0.10 \cdot \text{SIL}$

Observa-se, pelo Quadro 5.8, que no restabelecimento do sistema os módulos dos fasores de corrente e a carga na LT estão menores quando comparados ao período de pré-falta. Pouco mais de 20% da carga inicial está conectada ao sistema nos primeiros ciclos do religamento, o que pode ser explicado por uma estratégia de restabelecimento do SEP pela concessionária e também pela coordenação no religamento de algumas cargas significativas de grandes consumidores.

O terceiro e último caso em análise, trata-se de um transitório em uma LT de 138 kV causado por um curto-circuito AT na LT de 345 kV apresentado anteriormente. Devido à proximidade das LTs, a falta na LT de 345 kV gera um transitório nos sinais da LT de 138 kV, que é identificado pelo programa, conforme apresenta a Figura 5.20 e Figura 5.21.

Observa-se um afundamento na tensão da fase A e um aumento significativo na corrente de todas as fases, porém, não é notado uma abertura de disjuntor, já que nenhuma das fases de tensão e corrente assumiram valores próximos a zero após o transitório.

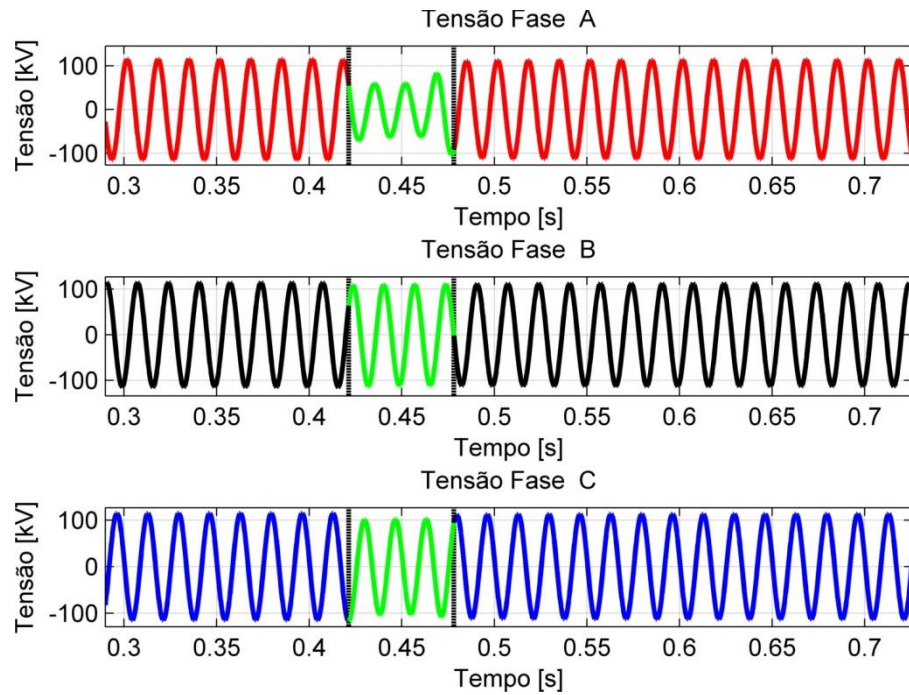


Figura 5.20– Identificação do transitório nas ondas de tensão de uma LT de 138 kV.

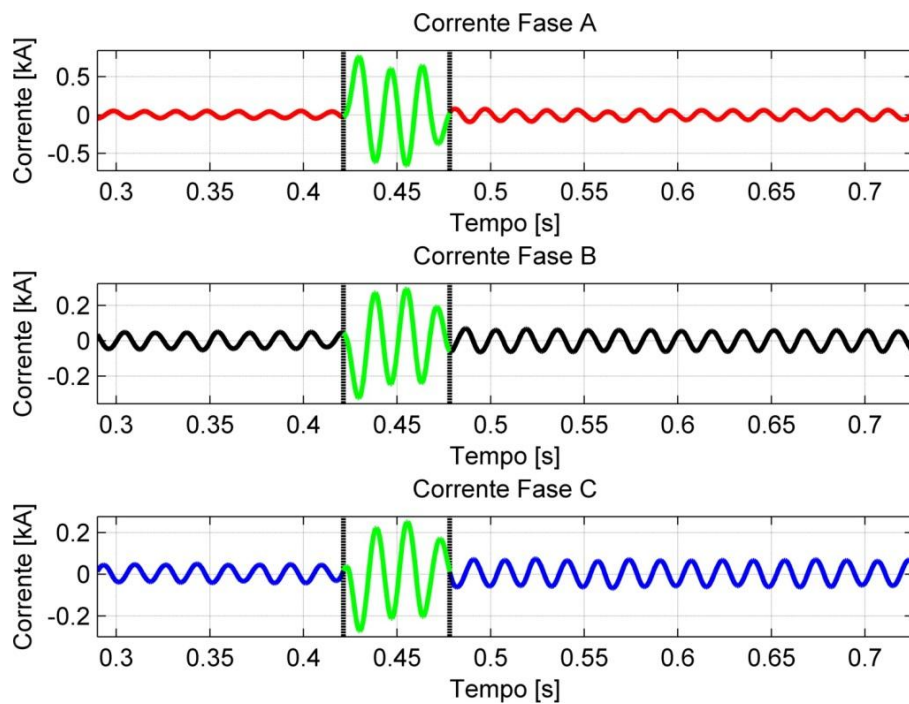


Figura 5.21– Identificação do transitório nas ondas de corrente de uma LT de 138 kV.

A Figura 5.22 e Figura 5.23 mostram as ondas de corrente e tensão analisadas juntamente com os seus módulos, provenientes da estimação fasorial.

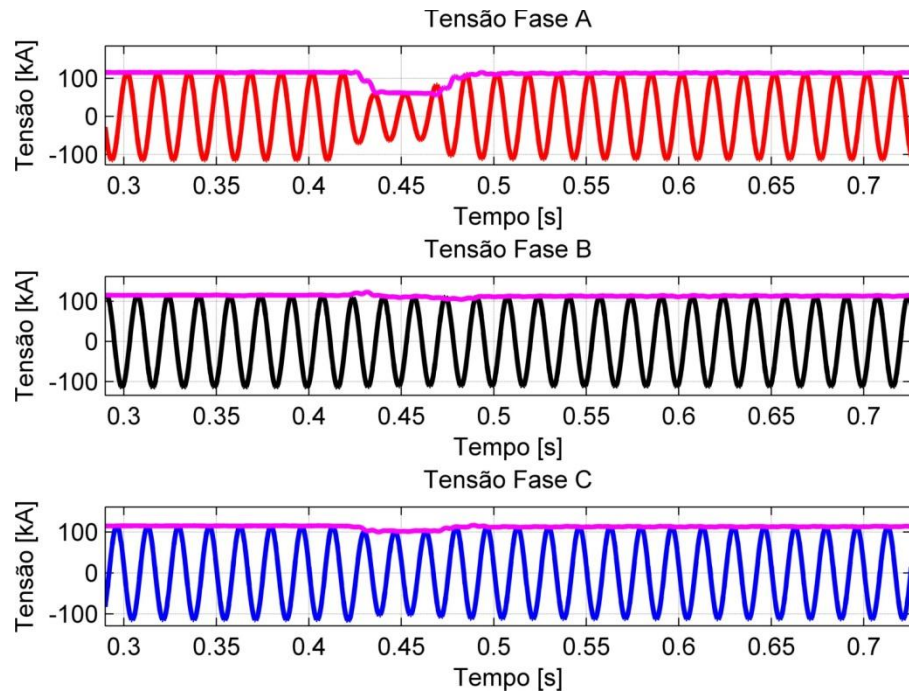


Figura 5.22– Estimação fasorial nos sinais de tensão de uma LT de 138 kV.

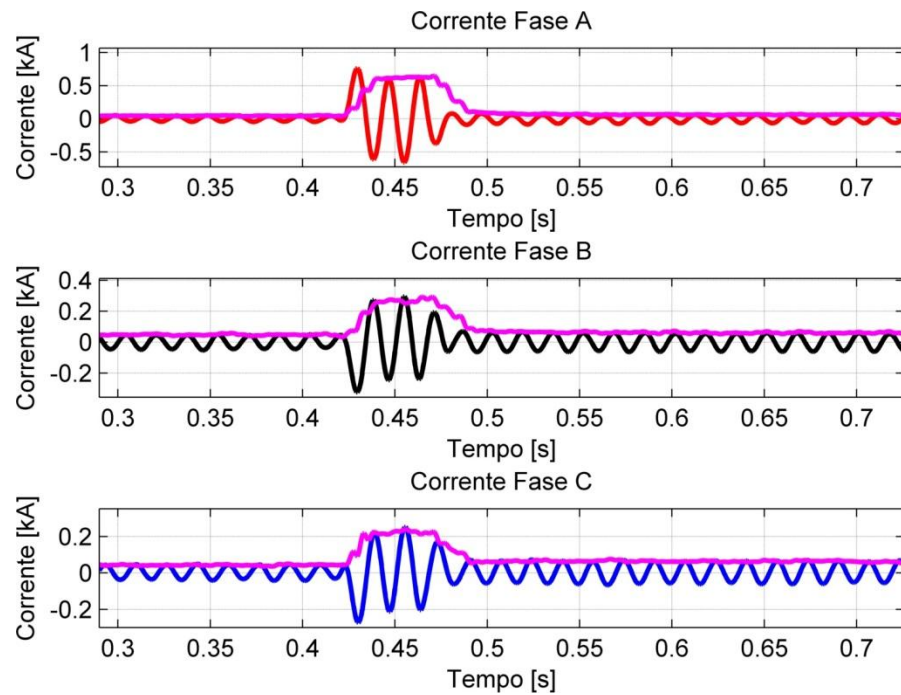


Figura 5.23– Estimação fasorial nos sinais de corrente de uma LT de 138 kV.

As principais informações a respeito da LT e dos sinais em análise são exibidas no relatório a seguir:

Quadro 5.9 - Dados gerais da LT de 138 kV

Dados da Linha: LT [REDACTED] 138 kV
 Data: 21/12/2003 Hora: 19:03:49
 Tipo de RDP: MEHTA001
 Frequência da rede = 60 Hz
 Tensão nominal = 138 kV
 Comprimento da Linha (LT) = 70.10 km
 Resistência de seq. positiva = 0.190 ohm/km
 Resistência de seq. zero = 0.477 ohm/km
 Reatância de seq. positiva = 0.499 ohm/km
 Reatância de seq. zero = 1.688 ohm/km
 Impedância de surto estimada: Entre 384 e 395 ohms
 SIL da linha estimado: Entre 48 e 50 MW

Nota-se que, a data e o instante em que ocorre o evento são os mesmos do caso analisado anteriormente, porém trata-se de outra LT, que possui 70,1 km e tensão nominal de 138 kV. Tanto a impedância característica estimada quanto o SIL estimado estão dentro dos padrões estabelecidos, como indicado na Tabela 4.1.

O quadro 5.10 apresenta os dados relativos ao período de pré-transitório.

Quadro 5.10 - Dados do período de pré-transitório da LT de 138 kV

Dados do Período de Pré-Transitório:
 Início do período: 0.00 ms Fim do período: 421.35 ms
 Duração: 421.35 ms
 $V_a = 1.02 \ll -37.40^\circ$ pu
 $V_b = 1.02 \ll -157.77^\circ$ pu
 $V_c = 1.02 \ll 82.61^\circ$ pu
 $I_a = 0.16 \ll 31.90^\circ$ pu
 $I_b = 0.16 \ll -92.69^\circ$ pu
 $I_c = 0.15 \ll 148.91^\circ$ pu
 Potência Aparente na LT (S): 8 MVA
 A LT está com carga leve de 0.16*SIL

Nesta análise em particular, o período é denominado pré-transitório e não pré-falta como nos casos anteriores, devido a inexistência de um curto-circuito. Observa-se que os fasores de corrente e tensão mostram que o sistema encontra-se equilibrado. Os módulos das correntes estão abaixo do nominal, indicando que a carga momentânea é leve, o que é comprovado com a informação de que a LT está operando com apenas $0,16 * SIL$.

O período transitório inicia-se no instante de 421 milissegundos e dura alguns ciclos, suas informações são exibidas a seguir:

Quadro 5.11 - Dados do período de transitório da LT de 138 kV

 Dados do Período Transitório:

Início do período: 421.35 ms

Fim do período: 478.12 ms

Duração: 56.77 ms

$V_a = 0.54 \ll -43.25^\circ$ pu

$V_b = 0.99 \ll -149.99^\circ$ pu

$V_c = 0.91 \ll 75.02^\circ$ pu

$I_a = 2.17 \ll 70.72^\circ$ pu

$I_b = 0.92 \ll -106.31^\circ$ pu

$I_c = 0.80 \ll -119.66^\circ$ pu

Análise de cada fase de tensão e corrente
 no transitório:

Subtensão elevada na fase A de $0.54 * V_{nom}$

Tensão normal na fase B de $0.99 * V_{nom}$

Tensão normal na fase C de $0.91 * V_{nom}$

Sobrecorrente elevada na fase A de $2.17 * I_{nom}$

Corrente normal na fase B de $0.92 * I_{nom}$

Subcorrente leve na fase C de $0.80 * I_{nom}$

Observando os fasores de tensão, nota-se que há uma queda de quase 50% no módulo da fase A, classificando-a como uma subtensão elevada. As fases B e C apesar das leves alterações, permanecem em níveis de tensão normal.

Todos os módulos dos fasores de corrente tiveram ganhos significativos quando comparados ao período pré-transitório, porém quando comparados a corrente nominal, apenas a fase A teve alteração significativa, classificando-a como sobrecorrente elevada.

Nenhuma falta é identificada nos sinais avaliados, como pode ser observado na Figura 5.24, onde nenhuma impedância entra nas unidades de proteção.

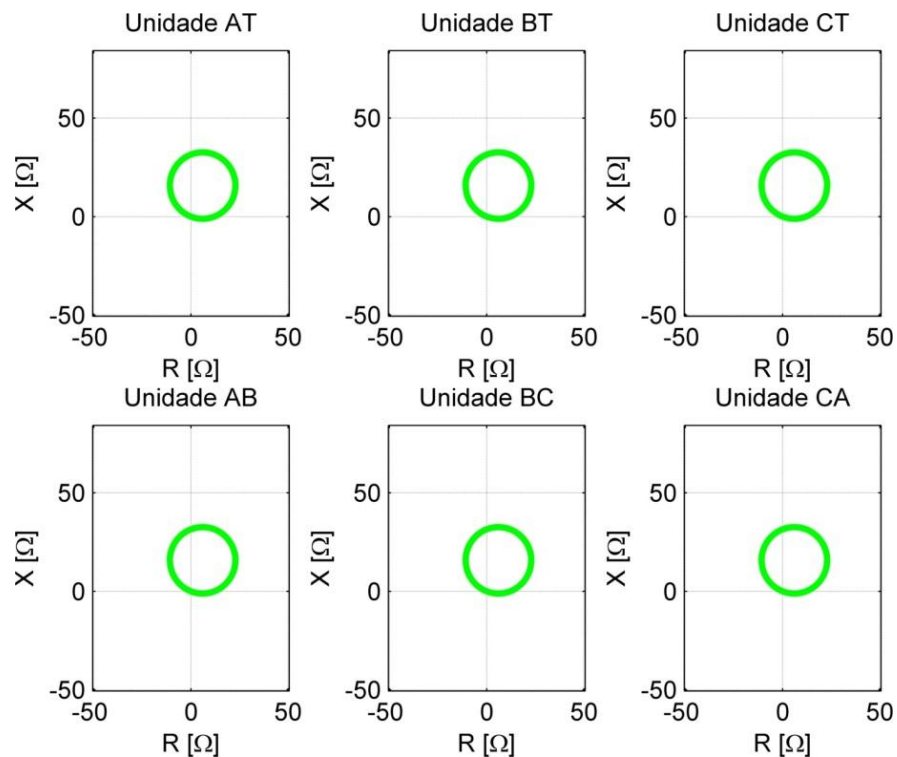


Figura 5.24 – Unidades do relé de distância para os sinais da LT de 138 kV.

Passados alguns ciclos de transitório o sistema volta à operação normal sem a necessidade de interrupção por abertura de disjuntor, como observado na Figura 5.20 e Figura 5.21 expostas anteriormente. As tensões voltam a operar com valores próximos aos nominais, já as correntes apresentam um pequeno ganho se comparado ao período pré-transitório, o que significa que a carga na LT está maior que no início do evento. A última etapa do relatório comprova estas informações a respeito das tensões, correntes e carga, conforme indica o Quadro 5.12.

O relatório gera uma análise completa de todos os períodos do evento transitório e desta forma facilita sua compreensão, podendo auxiliar no planejamento

da manutenção da concessionária de energia. Assim, este trabalho pode ter uma boa aplicabilidade na análise de transitórios em linhas de transmissão do SEP.

Quadro 5.12 - Dados do período de pós-transitório da LT de 138 kV

Dados do Período Pós-Transitório:

Início do período: 478.12 ms

Fim do período: 1568.75 ms

Duração: 1090.63 ms

$V_a = 1.02 \ll -38.02^\circ$ pu

$V_b = 1.01 \ll -158.41^\circ$ pu

$V_c = 1.01 \ll 81.70^\circ$ pu

$I_a = 0.20 \ll 91.04^\circ$ pu

$I_b = 0.18 \ll -28.51^\circ$ pu

$I_c = 0.20 \ll -145.31^\circ$ pu

A LT está com carga leve de $0.20 \cdot \text{SIL}$

Capítulo 6

CONCLUSÕES

6.1 Conclusões gerais

Esta dissertação apresentou um estudo a respeito de sinais transitórios provenientes de linhas de transmissões de diferentes níveis de tensões. Os sinais foram avaliados automaticamente por uma rotina computacional que dividiu o evento em diferentes períodos, gerando um relatório com as principais informações de cada caso analisado. Os resultados podem ajudar na análise de distúrbios como os curtos-circuitos ocorridos no SEP, facilitar a separação de eventos mais relevantes e colaborar no planejamento da manutenção.

Inicialmente, realizou-se uma revisão bibliográfica dos principais conceitos relacionados aos transitórios eletromagnéticos em sinais de tensão e corrente, onde foram citados os fenômenos mais comuns e os danos que estes podem causar. Em seguida, apresentou-se diferentes teorias utilizadas para desenvolvimento de algoritmos capazes de detectar transitórios, suas vantagens e desvantagens e algumas plataformas que podem ser utilizadas para a sua construção.

Na sequência, escolheu-se o filtro digital que seria desenvolvido para detecção de transitórios e relatou as principais vantagens de sua implementação,

que basicamente são: simplicidade no equacionamento matemático, resposta computacional mais rápida e precisão na localização do transitório. Apresentou-se a formulação matemática, que utilizou teorias de transformada Z para alguns equacionamentos, seguidos do desenvolvimento e arranjo final das equações utilizadas na construção do algoritmo.

De posse das informações necessárias, iniciou-se o processo de construção da rotina computacional com o detalhamento de cada uma das etapas, que envolvem conceitos importantes no tratamento de sinais em SEP. Foram desenvolvidas as etapas de filtragem, interpolação e estimação fasorial, onde nesta última, escolheu-se a construção do algoritmo dos métodos dos mínimos quadrados, que possui uma boa precisão na estimativa dos fasores. Em seguida, aplicou-se o filtro digital para detecção de transitório. Por fim, implementou-se a etapa de caracterização dos eventos transitórios, onde criaram-se denominações diferentes para cada período do sinal em análise, com a finalidade de classificá-los.

Após o desenvolvimento da rotina computacional, avaliaram-se alguns casos preliminares para teste do algoritmo. Em seguida, adaptou-se a rotina para utilização em casos de interesse prático, desta forma pôde-se avaliar sua efetividade com a obtenção de resultados concretos. Os gráficos e os relatórios gerados mostraram como o sistema funciona em diferentes períodos dos sinais, em especial pôde-se constatar, no período de pré-falta, que a LT é capaz de operar com carga superior à do SIL, o que dependerá do seu comprimento.

No período de transitório dos casos avaliados, observou-se afundamentos de tensão de mais de 50% nas fases sob falta, enquanto as correntes se multiplicaram por algumas unidades se comparadas ao período de pré-falta. Viu-se também que, uma falta monofásica em uma LT pode afetar a operação de uma LT vizinha, causando grandes oscilações em seus sinais.

O relatório apresentado para cada período do sinal permitiu uma rápida compreensão do evento analisado, o que agiliza a análise de casos de transitórios e pode ajudar na implementação de melhorias na operação do sistema. Ademais, pode auxiliar o planejamento da manutenção do SEP.

6.2 Propostas de continuidade

São sugestões para continuidade do trabalho:

- Calcular a localização de falta utilizando os dados de tensão e corrente de dois terminais da LT, já que este método é insensível a resistência de falta e a variação da impedância da fonte, localizando com mais precisão o ponto onde ocorre a falta;
- Implementar a lógica operacional dos relés do sistema na rotina computacional e definir como ele deveria atuar, desta forma podendo comparar com a ação real tomada pelos relés.
- Otimização da rotina computacional para melhoria da detecção em casos gerais de transitórios existentes no SEP.

6.3 Contribuições do trabalho

O trabalho aqui apresentado gerou alguns artigos que foram aceitos e apresentados em alguns eventos nacionais e internacionais, conforme mostra a tabela a seguir:

Tabela 6.1 – Trabalhos aceitos e apresentados em eventos.

Status	Evento	Título do artigo
Aceito	20th ISH – Buenos Aires	A Numerical Routine for the Transient Detection Associated with Power Systems
Apresentado	9º SSIA – Belo Horizonte-MG	Detecta – Detecção e Análise de Transitórios em Sistemas Elétricos de Potência
Apresentado	XV CEEL – Uberlândia-MG	Detecção e Caracterização de Transitórios Presentes em Oscilografias
Aceito	SBSE 2018 – Niterói-RJ	Analysis of a Simplified Digital Filter for the Automatic Identification of Transients Contained in Oscillographies

REFERÊNCIAS

- [1] C. Pereira *et al.*, “OSCILO – Sistema de Gerenciamento Automático de Registros Oscilográficos,” *XX SNPTEE*, Recife, pp. 1–9, 2009.
- [2] J. Martinez Velasco, *Power System Transients: Parameter Determination*, vol. 1. Boca Raton - FL, 2010.
- [3] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL, “Resolução Normativa nº 669-Regulamenta os Requisitos Mínimos de Manutenção e o Monitoramento da Manutenção de Instalações de Transmissão de Rede Básica.,” 2015.
- [4] International Electrotechnical Commission, “Technical Report IEC Tr 60071-4 Computational Guide to Insulation Co-ordination and Modelling of Electrical Networks,” Genebra-Switzerland, 2004.
- [5] Agência Nacional de Energia Elétrica - Aneel, “Resolução Normativa nº 729,” 2016.
- [6] T. C. de O. Carvalho, “Análise e Implementação de Métodos Aplicados aos Sinais Variantes no Tempo Presentes em Sistemas Elétricos de Potência,” Tese de Doutorado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, pp.169, 2013.
- [7] P. M. da Silveira, “Identificação e Localização de Falhas Utilizando Análise por Decomposição Wavelet Para Relés de Linhas de Transmissão,” Tese de Doutorado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, pp. 203, 2001.
- [8] H. M. de Oliveira, *Análise de Sinais para Engenheiros: Uma abordagem via WAVELETS*. Rio de Janeiro, Editora Brasport, vol 1, 2007.
- [9] A. Parraga, “Aplicação da transformada Wavelet Packet na análise e classificação de sinais de vozes patológicas.” Dissertação de Mestrado-Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, pp. 49–55, 2002.
- [10] I. The MathWorks, “Discrete Wavelet Analysis,” Natick, Massachusetts- EUA, 2017.
- [11] P. Sermwuthisarn, “Impulsive noise rejection method for compressed measurement signal in compressed sensing,” *EURASIP J. Adv. Signal Process.*, vol. 68, 2012.
- [12] C. Pereira, “Detecção de Transitórios em Sistemas Elétricos de Potência.” Belo Horizonte: Notas de Aula, pp. 1–5, 2016.
- [13] C. L. Phillips and H. T. Nagle, *Digital Control System Analysis and Design*, 3rd ed. New York: Prentice Hall, 1984.
- [14] E. G. da Silveira, “Localização Digital de Falhas em Linhas de Transmissão com Utilização dos Dados de um Terminal,” Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, pp. 117, 2001.
- [15] G. R. de S. Reis, “Análise do Comportamento das Unidades Quadrilaterais Polarizadas de Relé de Distância Frente a Curtos-Circuitos em Linhas de Transmissão,” Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, pp.132, 2015.

-
- [16] H. M. Veloso, "Índice de Desempenho dos Filtros Digitais para Proteção de Sistemas Elétricos de Potência," Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, pp.136, 2006.
- [17] R. T. Higuti, "Processamento Digital de Sinais - Amostragem e Reconstrução de Sinais," Ilha Solteira: Notas de Aula, pp. 2–12, 2003.
- [18] H. Nyquist, "Certain topics in telegraph transmission theory," *Trans. Am. Inst. Electr. Eng.*, vol. 47, no. 3, pp. 617–644, New York, 1928.
- [19] C. E. Shannon, "Communication in the Presence of Noise," *Proc. IEEE*, vol. 29, no. 1, pp. 60–93, New York, 1950.
- [20] P. G. G. Fernandes, "Filtro Anti-Aliasing para Sistema de Aquisição Sincronizada Implementado em FPGA." Dissertação de Mestrado - Programa de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, pp. 16–19, 2011.
- [21] C. Pereira *et al.*, "Localização de Falhas em Linhas de Transmissão Utilizando Dados de Dois Terminais," Universidade Federal de Minas Gerais, pp. 1–6, Belo Horizonte, 2006.
- [22] B. J. Mann and I. F. Morrison, "Digital Calculation of Impedance for Transmission Line Protection," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. 90, pp. 270–279, 1999.
- [23] G. B. Gilcrest, G. D. Rockefeller, and E. A. Udren, "High-Speed Distance Relaying Using a Digital Computer, Part I: System Description," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. 91, pp. 1235–1243, 1999.
- [24] C. Pereira, "Algoritmos para Relés Numéricos de Proteção," Belo Horizonte: Notas de Aula, pp. 75, 2015.
- [25] M. S. Sachdev and M. A. Baribeau, "A new algorithm for digital impedance relays," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-98, no. 6, pp. 2232–2240, 1979.
- [26] M. S. Sachdev and M. Nagpal, "A recursive least error squares algorithm for power system relaying and measurement applications," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 6, no. 3, pp. 1008–1015, 1991.
- [27] C. Pereira and F. C. e Cruz, "Análise do Comportamento Estático e Dinâmico dos Filtros Digitais de Mínimos Quadrados na Proteção de Linhas de Transmissão," *XV SNPTEE - Semin. Nac. Produção e Transm. Energ. Elétrica*, vol. 1, pp. 12–17.
- [28] C. Pereira, *Redes Elétricas no Domínio da Frequência*, Artliber E. São Paulo, 2015.
- [29] M. R. de Araújo, "Proteção de Distância em Linhas de Transmissão Longas e Extra Longas," Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, pp. 122, 2015.
- [30] C. Pereira, "Proteção de Distância," Belo Horizonte: Notas de Aula, pp. 95, 2015.