



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

CLEYDSON ADLLER DE CASTRO NASCIMENTO

SIMULADOR DIDÁTICO DE ESTIMAÇÃO FASORIAL E LOCALIZAÇÃO DE FALTAS
EM LINHAS DE TRANSMISSÃO TRIFÁSICAS (SELF3Ø)

MOSSORÓ/RN

2020

CLEYDSON ADLLER DE CASTRO NASCIMENTO

SIMULADOR DIDÁTICO DE ESTIMAÇÃO FASORIAL E LOCALIZAÇÃO DE FALTAS
EM LINHAS DE TRANSMISSÃO TRIFÁSICAS (SELF3Ø)

Dissertação apresentada ao Mestrado em Engenharia Elétrica do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Linha de Pesquisa: Sistemas Elétricos

Orientador: Prof. Dr. Adriano Aron Freitas de Moura

Co-orientadora: Prof^a. Dra. Melinda Cesianara Silva da Cruz

MOSSORÓ/RN

2020

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

N244s Nascimento, Cleydson Adller de Castro .

Simulador Didático de Estimação Fasorial e
Localização de Faltas em Linhas de Transmissão
Trifásicas (SELF3Ø) / Cleydson Adller de Castro
Nascimento. - 2020.

149 f. : il.

Orientador: Adriano Aron Freitas de Moura.
Coorientadora: Melinda Cesianara Silva da Cruz.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal

Rural do Semi-árido, Programa de Pós-graduação em
Engenharia Elétrica, 2020.

1. Estimação Fasorial. 2. Localização de Faltas.

3. Simulador Didático. 4. Interface Gráfica. I.
Moura, Adriano Aron Freitas de, orient. II. Cruz,
Melinda Cesianara Silva da, co-orient. III.
Título.

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

CLEYDSON ADLLER DE CASTRO NASCIMENTO

SIMULADOR DIDÁTICO DE ESTIMAÇÃO FASORIAL E LOCALIZAÇÃO DE FALTAS
EM LINHAS DE TRANSMISSÃO TRIFÁSICAS (SELF3Ø)

Dissertação apresentada ao Mestrado em Engenharia Elétrica do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Linha de Pesquisa: Sistemas Elétricos

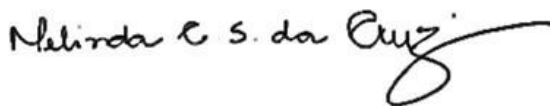
Defendida em: 06 / 07 / 2020

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Adriano Aron Freitas de Moura (UFERSA)

Presidente



Prof^a. Dra. Melinda Cesianara Silva da Cruz (UFERSA)

Membro Examinador Interno



Prof. Dr. Victor de Paula Brandão Aguiar (UFERSA)

Membro Examinador Interno



Prof. Dr. Ailson Pereira de Moura (UFC)

Membro Examinador Externo

À Maria Cleide, José Carlos e Cayssa Ágatha

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela oportunidade e força nos momentos mais difíceis durante essa caminhada.

Aos meus pais, José Carlos e Maria Cleide, que sempre me guiaram através do caminho do estudo, da integridade e da dedicação. Agradecer é pouco por tudo que fizeram por mim. Eu amo vocês!

A minha irmã Cayssa Ágatha, meu suporte em diversas situações e incentivadora deste sonho.

A minha namorada Alice Chaves, responsável por tanto apoio, confiança e amor. Obrigado por tudo, meu bem!

Ao meu grande amigo Nikolas Iohanathan, que trilhou junto comigo toda essa jornada desde o início da graduação até o fim do mestrado. Seu apoio foi essencial, meu irmão!

As minhas amigas de trabalho, Livya e Marcelle, que sempre me encorajaram nas situações difíceis.

Aos meus familiares, amigos e demais colegas que sempre me incentivaram.

RESUMO

A linha de transmissão é o equipamento do sistema elétrico mais propício a uma falta elétrica e normalmente, devido a sua grande extensão, encontra-se localizada em regiões distantes de centros urbanos e com mobilidade prejudicada. Com base nessas condições, utilizar algoritmos de localização apresenta-se como solução para identificar com precisão e velocidade o ponto de falta. A maioria dos algoritmos de localização emprega fasores medidos nos terminais da linha de transmissão, de forma que, para obtenção desses fasores são necessários métodos de estimação fasorial. O objetivo desse trabalho é desenvolver o Simulador Didático para Estimação Fasorial e Localização de Faltas em Linhas de Transmissão Trifásicas (SELF3Ø) com o intuito de apresentar o desempenho de técnicas de estimação fasorial, bem como de diferentes algoritmos de localização de faltas, afim de se tornar uma ferramenta de apoio ao ensino dos cursos de engenharia elétrica. Além da plataforma interativa poder ser utilizada no processo de ensino-aprendizagem em cursos de engenharia elétrica, também oferece de forma rápida e concisa soluções gráficas e numéricas voltadas a estimação fasorial e localização de faltas, podendo também ser utilizado em pesquisas acadêmicas. Para validar o simulador didático construído, compara-se seus resultados juntamente ao *software* ATP em cinco cenários, para uma topologia voltada a medições com dois ou três terminais.

Palavras-chave: Estimação Fasorial. Localização de Faltas. Simulador Didático. Interface Gráfica.

ABSTRACT

A transmission line or equipment in the electrical system that is more conducive to an electrical failure and, due to its large extension, is usually located in regions far from urban centers and with impaired mobility. Based on these conditions, the use of fault location techniques appears as a solution to identify with precision and speed the point of fault. Most location algorithms employ phasors measured at the transmission line terminals, so that, to obtain these phasors, methods of phasor estimation are needed. The objective of this work is to develop the Didactic Simulator for Phasor Estimation and Fault Location in Three-Phase Transmission Lines (SELF3Ø) in order to apply the performance of phasor estimation algorithms, as well as different fault techniques location, in order to become a tool to support the teaching of electrical engineering courses. In addition to the interactive platform, this simulator can be used in the teaching-learning process in electrical engineering courses, it also offers a fast and concise form of graphical and numerical solutions aimed at phasor estimation and fault technique location, it can also be used in academic research. To validate the didactic simulator, compare your results with the ATP software in five scenarios, for a topology using measurements with two or three terminals.

Key words: Phasor Estimation. Fault Location Technique. Didactic Simulator. User Interface.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Diagrama do SIN em operação -2019.....	18
Figura 2 - Classificação dos algoritmos de localização de faltas em relação ao janelamento de dados.....	25
Figura 3 - Janela Deslizante de Amostragem	25
Figura 4-Comportamento dos sinais elétricos em um curto-circuito	27
Figura 5-Componentes de alta frequência em um sinal de tensão elétrica.....	27
Figura 6- Ganho das respostas em frequência para o AFCC.....	30
Figura 7 - Ganho das respostas em frequência para o AFMC.....	32
Figura 8 - Ganho das respostas em frequência para o COSM.....	34
Figura 9 - Ganho das respostas em frequência para o AGKC.....	35
Figura 10 - Ganho das respostas em frequência para AFCC acoplado ao Filtro Mimico Digital	37
Figura 11 - Funcionamento dos algoritmos de localização utilizando fasores das componentes fundamentais do sinal	40
Figura 12 - Localizador de Falta Digital como Hardware.....	42
Figura 13 - Circuito equivalente de sequência positiva de uma linha de transmissão no instante pré-falta	44
Figura 14 - Interpretação geométrica entre x e y.....	46
Figura 15 - Lógica do algoritmo de sincronização de Monteiro et al. (2018).....	48
Figura 16 - Representação trifásica de uma LT em um modelo π	49
Figura 17 - Representação unifilar de uma LT com falta em um determinado ponto D.....	54
Figura 18 - Representação trifásica de uma falta elétrica em uma LT	55
Figura 19 - Circuito de sequência positiva durante uma falta	56
Figura 20 - Circuito de sequência negativa durante uma falta	56
Figura 21 - Falta elétrica em uma LT monofásica com parâmetros distribuídos em circuito π -equivalente.....	58
Figura 22 - Sistema com três terminais de medição.....	61
Figura 23 - Falta elétrica ocorrida no trecho LS.....	62
Figura 24 - Falta elétrica ocorrida no trecho LR	64
Figura 25 - Falta elétrica ocorrida no trecho LP.....	66
Figura 26 - Simplificação proposta por Girgis, Hart e Peterson (1992).....	68
Figura 27 - Fluxograma das páginas do SELF3Ø.....	71
Figura 28 - Logomarca do SELF3Ø	71
Figura 29 - Página Inicial do SELF3Ø	72
Figura 30 - Configurações Iniciais do SELF3Ø.....	73
Figura 31 - Caracterização da LT de 2 Terminais no SELF3Ø	74
Figura 32-Sinais de Simulação de 2 Terminais no SELF3Ø	75
Figura 33 - Estimção Fasorial de 2 Terminais no SELF3Ø	77
Figura 34- Localização de Faltas em Sistema com 2 Terminais no SELF3Ø	78
Figura 35 - Caracterização da LT de 3 Terminais no SELF3Ø	80
Figura 36-Sinais de Simulação de 3 Terminais no SELF3Ø	81
Figura 37 - Estimção Fasorial de 3 Terminais no SELF3Ø	82
Figura 38- Localização de Faltas em Sistema com 3 Terminais no SELF3Ø	84
Figura 39 - SEP adotado para simulação de 2 Terminais.....	86
Figura 40 – SEP adotado para simulação de 2 Terminais	87

Figura 41 - Página "Sinais de Simulação-2T" para Cenário 1 e sinal isa	90
Figura 42 - Sinal isa apresentado no software ATP para o Cenário 1	90
Figura 43 - Página "Estimação Fasorial -2T" Pré-Falta para Cenário 1.....	91
Figura 44 - Curva do janelamento de dados para estimação fasorial da corrente ISA pré-falta no Cenário 1	93
Figura 45 - Página "Estimação Fasorial -2T" Pós-Falta para Cenário 1	94
Figura 46 - Curva do janelamento de dados para estimação fasorial da corrente ISA pós-falta no Cenário 1	95
Figura 47 - Página "Localização de Faltas - 2T" relativo ao Cenário 1	96
Figura 48 - Comportamento Gráfico da localização de falta para o Cenário 1	96
Figura 49 - Página "Sinais de Simulação-2T" para Cenário 2 e sinal isb	99
Figura 50 - Sinal isb apresentado no software ATP	99
Figura 51 - Página "Estimação Fasorial -2T" Pré-Falta para Cenário 2.....	100
Figura 52 - Curva do janelamento de dados para estimação fasorial da corrente ISB pré-falta no Cenário 2	102
Figura 53 - Página "Estimação Fasorial -2T" Pós-Falta para Cenário 2	103
Figura 54 - Curva do janelamento de dados para estimação fasorial da corrente ISB pós-falta no Cenário 2	104
Figura 55 - Página "Localização de Faltas - 2T" relativo ao Cenário 2	105
Figura 56 - Comportamento Gráfico da localização de falta para o Cenário 2	105
Figura 57 - Página "Sinais de Simulação-2T" para Cenário 3 e sinal isc	107
Figura 58 - Sinal isc apresentado no software ATP para o Cenário 3.....	108
Figura 59 - Página "Estimação Fasorial -2T" Pré-Falta para Cenário 3.....	109
Figura 60 - Curva do janelamento de dados para estimação fasorial da corrente ISA pré-falta no Cenário 3	110
Figura 61 - Página "Estimação Fasorial -2T" Pós-Falta para Cenário 3	111
Figura 62 - Curva do janelamento de dados para estimação fasorial da corrente ISC pós-falta no Cenário 3	112
Figura 63 - Página "Localização de Faltas - 2T" relativo ao Cenário 3	113
Figura 64 - Comportamento Gráfico da localização de falta para o Cenário 3.....	113
Figura 65 - Página "Sinais de Simulação-3T" para Cenário 4 e sinal isc	115
Figura 66 - Sinal isc apresentado no software ATP para o Cenário 4.....	116
Figura 67 - Página "Estimação Fasorial -3T" Pré-Falta para Cenário 4.....	117
Figura 68 - Curva do janelamento de dados para estimação fasorial da corrente ISC pré-falta no Cenário 4	119
Figura 69 - Página "Estimação Fasorial -3T" Pós-Falta para Cenário 4	119
Figura 70 - Curva do janelamento de dados para estimação fasorial da corrente ISC pós-falta no Cenário 4	121
Figura 71 – Página "Localização de Faltas - 3T" relativo ao Cenário 4	122
Figura 72 - Página "Sinais de Simulação-3T" para Cenário 5 e sinal isc	124
Figura 73 - Sinal isb apresentado no software ATP para o Cenário 5	124
Figura 74 - Página "Estimação Fasorial -3T" Pré-Falta para Cenário 5.....	125
Figura 75 - Curva do janelamento de dados para estimação fasorial da corrente ISB pré-falta no Cenário 5	127
Figura 76 - Página "Estimação Fasorial -2T" Pós-Falta para Cenário 5	128

Figura 77 - Curva do janelamento de dados para estimação fasorial da corrente ISB pós-falta no Cenário 5	129
Figura 78 - Página "Localização de Faltas - 3T" relativo ao Cenário 5	130

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Probabilidade de ocorrência de falta nos equipamentos de um sistema elétrico.....	19
Tabela 2 - Características Básicas do SELF3Ø	70
Tabela 3 - Modo de organização dos dados simulados no arquivo de texto	75
Tabela 4 - Comportamento da lâmpada indicativa.....	76
Tabela 5 - Sigla dos Métodos de Estimação aplicados no SELF3Ø.....	77
Tabela 6- Algoritmos de Localização de Falta implementados no SELF3Ø.....	79
Tabela 7 - Modo de organização dos dados simulados no arquivo de texto	81
Tabela 8 - Parâmetros para uma LT de 138 kV.....	85
Tabela 9 - Parâmetros para uma LT de 230 kV.....	85
Tabela 10 - Parâmetros para uma LT de 500 kV.....	85
Tabela 11 - Parâmetros para definição das simulações	87
Tabela 12 - Parâmetros necessários para Configurações Iniciais das Simulações	88
Tabela 13 - Parâmetros do Cenário 1	89
Tabela 14 - Ponto de falta e Tempo de Falta para o Cenário 1	90
Tabela 15 - Fasores estimados utilizando o AFCC para frequência fundamental e 3º Ciclo para o Cenário 1.....	92
Tabela 16 - Ângulos de sincronização para o Cenário 1	92
Tabela 17 - Fasores estimados utilizando o AFCC para frequência fundamental e 3º Ciclo para o Cenário 1.....	94
Tabela 18 - Localização da Falta para o Cenário 1	97
Tabela 19 - Erro Médio por Ciclo para o Cenário 1	97
Tabela 20 - Parâmetros do Cenário 2	97
Tabela 21 - Ponto de falta e Tempo de Falta para o Cenário 2	99
Tabela 22 - Fasores estimados utilizando o AFCC para frequência fundamental e 3º Ciclo para o Cenário 2.....	101
Tabela 23 - Ângulos de sincronização para o Cenário 2	101
Tabela 24 - Fasores estimados utilizando o AFCC para frequência fundamental e 3º Ciclo para o Cenário 2.....	103
Tabela 25 - Localização da Falta para o Cenário 2	106
Tabela 26 - Erro Médio por Ciclo para o Cenário 2	106
Tabela 27 - Parâmetros do Cenário 3	106
Tabela 28 - Ponto de falta e Tempo de Falta para o Cenário 3	108
Tabela 29 - Fasores estimados utilizando o AFCC para frequência fundamental e 3º Ciclo para o Cenário 3.....	109
Tabela 30 - Ângulos de sincronização para o Cenário 3	110
Tabela 31 - Fasores estimados utilizando o AFCC para frequência fundamental e 3º Ciclo para o Cenário 3.....	111
Tabela 32 - Localização da Falta para o Cenário 3	114
Tabela 33 - Erro Médio por Ciclo para o Cenário 3.....	114
Tabela 34 - Parâmetros do Cenário 4	114
Tabela 35 - Ponto de falta e Tempo de Falta para o Cenário 4	116

Tabela 36 - Fasores estimados utilizando o AFCC para frequência fundamental e 3º Ciclo para o Cenário 4.....	118
Tabela 37 - Fasores estimados utilizando o AFCC para frequência fundamental e 3º Ciclo para o Cenário 4.....	120
Tabela 38 - Localização da Falta para o Cenário 4	122
Tabela 39 - Erro Médio por Ciclo para o Cenário 4.....	122
Tabela 40 - Parâmetros do Cenário 5	123
Tabela 41 - Ponto de falta e Tempo de Falta para o Cenário 5	125
Tabela 42 - Fasores estimados utilizando o AFCC para frequência fundamental e 3º Ciclo para o Cenário 5.....	126
Tabela 43 - Fasores estimados utilizando o AFCC para frequência fundamental e 3º Ciclo para o Cenário 5.....	128
Tabela 44 - Localização da Falta para o Cenário 5	130
Tabela 45 - Erro Médio por Ciclo para o Cenário 5.....	131

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AFCC – Algoritmo de Fourier de Ciclo Completo

AFMC – Algoritmo de Fourier de Meio Ciclo

AGKC- Algoritmo de Guo, Kezunovic e Chen

AJJ – Algoritmo de Johns e Jamali

ATP – *Alternative Transients Programs*

CA – Corrente Alternada

CC – Corrente Contínua

FCOS – Filtro Cosseno

FCSM – Filtro Cosseno Modificado

GHP – Algoritmo de Girgis, Hart e Peterson

GPS – *Global Positioning Systems*

ID – Índice de Desempenho

LT – Linha de Transmissão

MIMIC – Filtro Mímico Digital

PRE – Algoritmo Proposto por Preston et al.

PMU – *Phasor Measurement Units*

RDP – Registradores Digitais de Perturbação

SELF3Ø - Simulador Didático de Estimação Fasorial e Localização de Faltas em Linhas de Transmissão Trifásicas

SEP – Sistema Elétrico de Potência

SIN – Sistema Interligado Nacional

TC – Transformador de Corrente

TP – Transformador de Potencial

TWD – Transformada Wavelet Discreta

SUMÁRIO

1.INTRODUÇÃO	18
1.1.MOTIVAÇÃO	20
1.2.OBJETIVOS	21
1.2.1.Gerais.....	21
1.2.2.Específicos	21
1.3.ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	21
2.FUNDAMENTOS DA ESTIMAÇÃO FASORIAL.....	23
2.1.JANELAMENTO DE SINAIS	23
2.1.1.Janela Deslizante de Amostragem	25
2.2.FONTES DE ERROS NOS MÉTODOS DE ESTIMAÇÃO FASORIAL.....	26
2.2.1.Componente CC de Decaimento Exponencial	26
2.2.2.Componentes de Alta Frequência	27
2.3.ALGORITMOS BASEADOS NA SÉRIE DE FOURIER.....	28
2.3.1.Algoritmo de Fourier de Ciclo Completo (AFCC).....	29
2.3.2.Algoritmo de Fourier de Meio Ciclo (AFMC)	31
2.4.FILTRO COSSENO (FCOS).....	32
2.5.FILTRO COSSENO MODIFICADO (FCSM)	33
2.6.ALGORITMO DE GUO, KEZUNOVIC E CHEN (AGKC).....	34
2.7.FILTRO MÍMICO DIGITAL PROPOSTO POR BENMOUYAL (MIMIC)	35
2.8.ÍNDICES DE DESEMPENHO DA ESTIMAÇÃO FASORIAL	38
2.8.1.Índice de Desempenho 1 (<i>ID1</i>)	38
2.8.2.Índice de Desempenho 2 (<i>ID2</i>).....	39
2.8.3.Índice de Desempenho 3 (<i>ID3</i>).....	39
3.FUNDAMENTOS DA LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO	40
3.1.ESTRUTURA DE UM LOCALIZADOR DE FALTAS	41
3.1.1.Localizador de Falta Digital como <i>Hardware</i>	42
3.1.2.Localizador de Falta Digital como <i>Software</i>	43
3.2.SINCRONIZAÇÃO DE REGISTROS OSCILOGRÁFICOS	43
3.2.1.Sincronização de dados proposta por Monteiro et al. (2018).....	44
3.3.ALGORITMO DE IDENTIFICAÇÃO DO INÍCIO DA FALTA	48
3.3.1.Método de comparação de ciclos para localização do início de uma falta elétrica	49

3.4.MATRIZ DE IMPEDÂNCIA E ADMITÂNCIA EM UMA LINHA DE TRANSMISSÃO TRIFÁSICA.....	49
3.5.ÍNDICE DE DESEMPENHO PARA LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO	51
4.TÉCNICAS DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO.	53
4.1.ALGORITMO PROPOSTO POR GIRGIS, HART E PETERSON UTILIZANDO DADOS DE DOIS TERMINAIS	53
4.2.ALGORITMO PROPOSTO POR PRESTON ET AL. UTILIZANDO DADOS DE DOIS TERMINAIS	55
4.3.ALGORITMO PROPOSTO POR JOHNS E JAMALI UTILIZANDO DADOS DE DOIS TERMINAIS	57
4.3.1.Considerações Práticas do Algoritmo de Jonhs e Jamali (1990)	60
4.4.ALGORITMO DE GIRGIS, HART E PETERSON UTILIZANDO DADOS DE TRÊS TERMINAIS.....	61
4.4.1.Falta elétrica em LS	62
4.4.2.Falta elétrica em LR	63
4.4.3.Falta elétrica em LP	65
4.4.4.Simplificação proposta por Girgis, Hart e Peterson (1992)	67
5.SIMULADOR DIDÁTICO PROPOSTO	69
5.1.SOBRE A CRIAÇÃO DA INTERFACE GRÁFICA	69
5.2.DEFINIÇÕES BÁSICAS DO SELF.3Ø.....	69
5.3.APRESENTAÇÃO DAS PÁGINAS DO PROGRAMA E SUAS FUNCIONALIDADES.....	70
5.3.1.Página de Apresentação do Programa	71
5.3.2.Página “Configurações Iniciais”	72
5.3.3.Escolha por Medição a 2 Terminais	73
5.3.3.1.Caracterização da Linha de Transmissão	74
5.3.3.2.Aba “Sinais de Simulação-2T”	74
5.3.3.3.Página “Estimação Fasorial-2T”	76
5.3.3.4.Tela “Localização de Faltas-2T”	78
5.3.4.Escolha por Medição a 3 Terminais	79
5.3.4.1.Caracterização da Linha de Transmissão	80
5.3.4.2.Aba “Sinais de Simulação - 3T”	81
5.3.4.3.Página “Estimação Fasorial – 3T”	82
5.3.4.4.Tela “Localização de Faltas – 3T”	83

5.4.CARACTERÍSTICAS DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO SIMULADAS	85
5.5.MODELO DA REDE ADOTADA	85
5.5.1.Sistema para Medição com Dois Terminais.....	86
5.5.2.Sistema para Medição com Três Terminais	86
5.6.SIMULAÇÕES COM O SELF3Ø	87
6.SIMULAÇÕES COM O SELF3Ø	88
6.1.CENÁRIO 1 – LT 138 KV, 2 TERMINAIS E FALTA MONOFÁSICA	88
6.1.1.Página “Sinais de Simulação – 2T”	89
6.1.2.Página “Estimação Fasorial -2T”	91
6.1.2.1.Fasores Pré-Falta	91
6.1.2.2.Fasores Pós-Falta.....	93
6.1.3.Página “ Localização de Faltas -2T”	96
6.2.CENÁRIO 2 - LT 230 kV, 2 TERMINAIS E FALTA BIFÁSICA	97
6.2.1.Página “Sinais de Simulação – 2T”	98
6.2.2.Página “Estimação Fasorial -2T”	100
6.2.2.1.Fasores Pré-Falta	100
6.2.2.2.Fasores Pós-Falta.....	102
6.2.3.Página “ Localização de Faltas -2T”	105
6.3.CENÁRIO 3 - LT 500 kV, 2 TERMINAIS E FALTA TRIFÁSICA.....	106
6.3.1.Página “Sinais de Simulação – 2T”	107
6.3.2.Página “Estimação Fasorial -2T”	108
6.3.2.1.Fasores Pré-Falta	108
6.3.2.2.Fasores Pós-Falta.....	111
6.3.3.Página “ Localização de Faltas -2T”	113
6.4.CENÁRIO 4 - LT 138 kV, 3 TERMINAIS E CURTO MONOFÁSICO	114
6.4.1.Página “Sinais de Simulação – 3T”	115
6.4.2.Página “Estimação Fasorial -3T”	116
6.4.2.1.Fasores Pré-Falta	116
6.4.2.2.Fasores Pós-Falta.....	119
6.4.3.Página “ Localização de Faltas -3T”	121
6.5.CENÁRIO 5 - LT 230 kV, 3 TERMINAIS E CURTO BIFÁSICO.....	123
6.5.1.Página “Sinais de Simulação – 3T”	123
6.5.2.Página “Estimação Fasorial -3T”	125

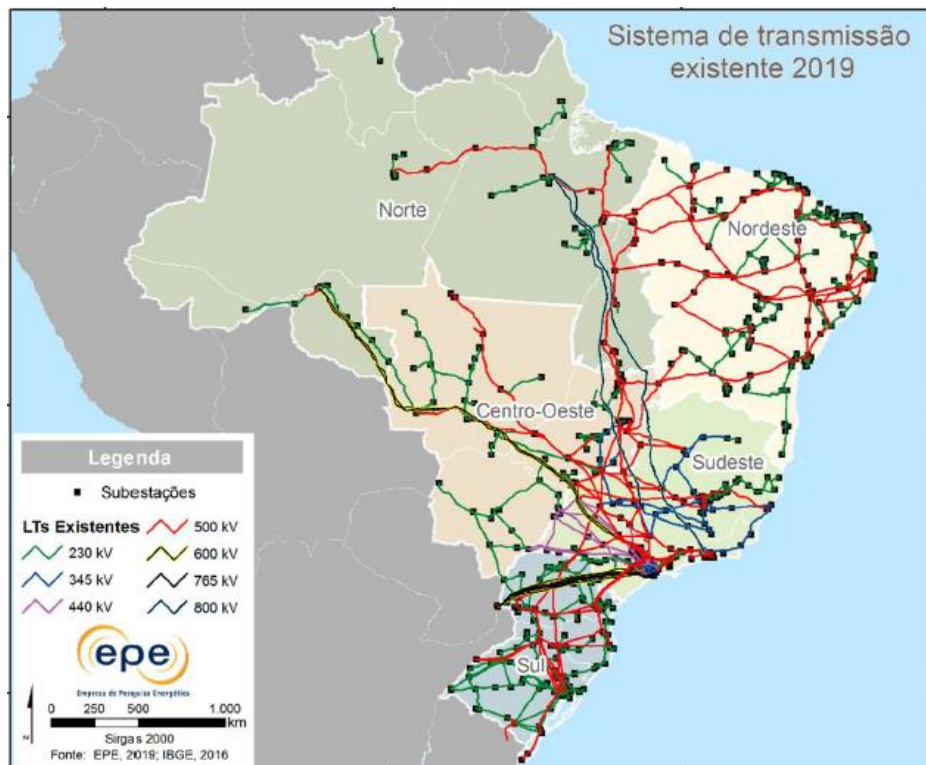
6.5.2.1.Fasores Pré-Falta	125
6.5.2.2.Fasores Pós-Falta.....	127
6.5.3.Página “ Localização de Faltas -3T”	130
7.CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	132
REFERÊNCIAS	135

1. INTRODUÇÃO

A linha de transmissão é componente do sistema elétrico com a função de transportar os blocos de energia proveniente do processo de geração, em direção as subestações, de onde serão orientadas para consumo.

A nível nacional, a Rede Básica de Transmissão do Sistema Interligado Nacional (SIN) compreende os níveis de tensões de 230 kV, 345 kV, 440 kV, 500 kV, 600 kV, 765 kV e 800 kV, como mostrado em distribuição geográfica junto a Figura 1. Se apresenta também em território nacional as linhas de transmissão nos níveis de 138 kV, como por exemplo as comandadas junto a Eletrosul, que possuem em conjunto 1918,49 km de extensão (ELETROBRAS, 2020).

Figura 1- Diagrama do SIN em operação -2019



Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (2019)

Além de ser elemento intermediador entre a geração e as subestações, as linhas de transmissão do SIN garantem a estabilidade e a confiabilidade da rede elétrica, a integração energética com países vizinhos, além de potencializar a geração hidrelétrica devido a interligação entre as bacias hidrográficas (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2019 p.107).

Um sistema elétrico de potência em operação é arquitetado de modo a atender a demanda solicitada, mantendo-se os padrões de qualidade, confiabilidade e continuidade do fornecimento, sendo assim necessário incorporar a ele as estratégias de proteção (RAYBOLT, 2011 p.1). As estratégias surgem para prevenir os possíveis problemas causados por faltas elétricas no sistema.

Essas faltas elétricas representam condições anormais de operação do sistema, podendo ser ocasionadas por problemas de natureza elétrica (falhas de isolamento, descargas atmosféricas e chaveamentos), mecânica (corrosão, erosão e arborização) e térmica (sobrecarregamento do sistema). (SILVA, 2009 p.1).

O equipamento do sistema elétrico mais susceptível a faltas, devido a suas grandes dimensões e exposição é a linha de transmissão (SILVA, 2009 p.1). A Tabela 1 apresentada por Painthankar e Bhide (2003, p.5) expõe a distribuição percentual de faltas por equipamento que constitui um sistema elétrico, onde evidencia a probabilidade de 50% dessas faltas ocorrerem nas linhas de transmissão, mostrando assim a real necessidade de localizar as faltas nesse equipamento.

Tabela 1- Probabilidade de ocorrência de falta nos equipamentos de um sistema elétrico

Equipamento do Sistema de Potência	Probabilidade de Ocorrência (%)
Linhas Aéreas	50%
Cabos subterrâneos	9%
Transformadores e Reatores	10%
Geradores	7%
Disjuntores	12%
Transformadores de instrumento e equipamentos de controle	12%

Fonte: Paithankar e Bhide (2003)

Além da sua exposição e tamanho, a linha de transmissão apresenta outras características que prejudicam a localização de faltas, como a sua construção distante dos centros urbanos e em locais de mobilidade comprometida. De acordo com Raybolt (2011, p.4), os autores abordam as dificuldades e problemas ocorrentes para localizar uma falta utilizando o método convencional, que é a identificação do local de falta através de inspeção de patrulha ou por helicóptero.

O processamento digital de sinais surge como alternativa para esse problema e pode ser usado para determinar o ponto de falta, onde é possível implementar algoritmos de localização em relés digitais para tal feito (SILVEIRA, 2007 p.18).

Conforme afirma Santo (2013 p.3), uma grande parcela dos métodos de localização de faltas é baseada na estimação de fasores dos dados de tensões e correntes do sistema, em função de sua componente fundamental. Um fasor é uma representação de um sinal senoidal de modo invariante no tempo, onde os valores de amplitude, frequência e ângulo de fase representam com fidelidade o sinal original (MARSOLLA, 2015, p.29).

1.1. MOTIVAÇÃO

Percebe-se, com base no histórico apresentado, a importância do estudo sobre a estimação fasorial e a localização de faltas para a proteção de uma linha de transmissão de energia elétrica, visto que esses conceitos são essenciais para manter a qualidade e continuidade do fornecimento de energia para os blocos consumidores.

Em termos educacionais, todas as teorias envolvidas junto a esses temas acabam por ficar um tanto abstrata para os discentes dos cursos de engenharia elétrica, que muitas vezes estudam fundamentos dos sistemas elétricos, conceitos de transmissão de energia elétrica e teorias de proteção de sistemas elétricos, mas não conseguem fazer uma relação destas com uma aplicação prática.

Nesse contexto, o uso de *softwares* se apresenta como aplicação prática dos conteúdos teóricos, além de ser uma estratégia de amparo ao processo de ensino-aprendizagem, principalmente nos dias atuais, onde as metodologias ativas se tornaram essenciais nos cursos de engenharia. Dessa forma, fazendo uso de uma interface gráfica, seria possível apresentar resultados numéricos e gráficos para agregar alternativas didáticas de ensino e formas de fixar conhecimento para os seus usuários.

Diante disso, este trabalho propõe a construção do Simulador Didático para Estimação Fasorial e Localização de Faltas em Linhas de Transmissão Trifásicas (SELF3Ø), ferramenta esta que oferece a possibilidade de verificar o comportamento das tradicionais técnicas de estimação fasorial, bem como aplicação de algoritmos de localização de faltas existentes na literatura.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Gerais

Desenvolver o Simulador Didático de Estimação Fasorial e Localização de Faltas em Linhas de Transmissão Trifásicas (SELF3Ø) através de um *software* de interface gráfica e programação orientada a eventos e validá-lo com objetivo de uso de forma didática nas disciplinas de Engenharia Elétrica.

1.2.2. Específicos

- Apresentar os sinais de tensões e correntes discretizados no domínio do tempo e em função do número de amostras;
- Detectar uma Falta Elétrica na Linha de Transmissão;
- Realizar análises Pré-falta e Pós-Falta;
- Estimar os fasores dos sinais de tensões e correntes utilizando técnicas descritas na literatura e obedecendo o janelamento de sinais;
- Mensurar o desempenho das estimações fasoriais através de índices;
- Determinar o ponto de falta calculado por diversos algoritmos de localização existentes na literatura, baseando-se no janelamento de sinais;
- Avaliar a precisão da localização de falta com base em índices de desempenho;

1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A dissertação encontra-se organizada com a seguinte estrutura:

- No Capítulo 2 realiza-se uma descrição do estado da arte dos fundamentos da estimação fasorial, apresentando as técnicas de janelamento de sinais, as fontes de erros em estimações fasoriais e os principais métodos de estimação fasorial, sendo esses: O Algoritmo de Fourier de Ciclo Completo; O Algoritmo de Fourier de Meio Ciclo; O Filtro Cosseno; O Filtro Cosseno Modificado; Algoritmo de Guo, Kezunovic e Chen (2003) e o Filtro Mímico Digital proposto por Benmouyal (1995). Além disso, apresenta-se os índices de desempenho para o processo de estimação.
- O Capítulo 3 expõe os fundamentos necessários para entendimento do processo de localização de faltas, apresentando: como é a estrutura de um localizador de faltas; o processo de sincronização de registros oscilográficos; o algoritmo para localização do ponto de início da falta; a modelagem trifásica da matriz de impedância e admitância da

linha de transmissão e os índices que quantificam o desempenho da localização da falta elétrica.

- No Capítulo 4, por sua vez, apresenta-se algumas das técnicas de localização de faltas que utilizem as componentes fundamentais dos fasores extraídos dos dados de corrente e tensão elétrica do sistema. Os métodos apresentados são: o Algoritmo proposto por Girgis, Hart e Peterson (1992); o Algoritmo Proposto por Preston et al. (2011) e o Algoritmo Proposto por Jonhs e Jamali (1990).
- Em seguida, no Capítulo 5, são descritos os estágios necessários para desenvolvimento do Simulador Didático de Estimação Fasorial e Localização de Faltas em Linhas de Transmissão Trifásicas (SELF3Ø) e as especificidades do simulador construído. Apresenta-se nessa seção a interface, suas definições básicas, as páginas do programa, as características das linhas de transmissão utilizadas no simulador e o modelo da rede adotada.
- O Capítulo 6 apresenta os resultados das simulações construídas com a intenção de validar o simulador. Apresenta-se cinco cenários de simulação, sendo eles: uma linha de 138 kV com medição a dois terminais e falta monofásica, uma linha de 230 kV com medição a dois terminais e falta bifásica, uma linha de 500 kV com medição a dois terminais e falta trifásica, uma linha de 138 kV com medição a três terminais e falta monofásica entre os terminais S e P, e uma linha de 230 kV com medição a três terminais e falta bifásica entre os terminais S e R.
- Por fim, o Capítulo 7 apresenta as conclusões a respeito do comportamento do Simulador Didático de Estimação Fasorial e Localização de Faltas em Linhas de Transmissão Trifásicas (SELF3Ø) baseado nas respostas oferecidas nos cenários de simulação.

2. FUNDAMENTOS DA ESTIMAÇÃO FASORIAL

A estimação fasorial é o processo que se utiliza de um algoritmo para determinar a amplitude e a fase de um determinado sinal no domínio do tempo (seja ele tensão ou corrente, para fins elétricos).

Sistemas Elétricos de Potência (SEPs) utilizam comumente a técnica de estimação fasorial de modo que, com base nos sinais elétricos alternados, torna-se possível caracterizar o sistema apenas conhecendo os fasores associados a esses sinais (MARSOLLA, 2015, p.29). Além disso, esses métodos de estimação podem ser utilizados para localizar faltas elétricas no sistema, caso utilizem relés à distância digitais baseados no cálculo dos fasores na frequência fundamental.

As técnicas de estimação fasorial devem calcular os fasores de modo preciso e rápido, mesmo com interferências da componente contínua (CC) de decaimento exponencial, transitórios ocasionados por transformadores de potencial (TPs), não linearidades acometidas por saturação do núcleo de transformadores de corrente (TCs), entre outras interferências (SCHWEITZER; HOU, 1992).

Este capítulo apresenta os fundamentos da estimação fasorial, tais como o janelamento de sinais, as principais fontes de erro no processo de estimação, além dos principais métodos de estimação fasorial contidos na literatura. As técnicas abordadas no trabalho foram o Algoritmo de Fourier de Ciclo Completo, o Algoritmo de Fourier de Meio Ciclo, o Filtro Cosseno, o Filtro Cosseno Modificado, o Algoritmo de Guo, Kezunovic e Chen (2003) e o Filtro Mímico Digital proposto por Benmouyal (1995). Por último, apresenta-se índices de desempenho que qualificam esse processo de estimação fasorial

2.1. JANELAMENTO DE SINAIS

Os algoritmos de estimação fasorial mensuram a amplitude e o ângulo de fase dos sinais alternados com base em uma quantidade de amostras inseridas em um intervalo de tempo, conhecida como janela de amostragem ou janela de dados. (MASCHER, 2010 p.61).

Com relação ao janelamento dos sinais, os algoritmos de estimação fasorial podem ser classificados como:

1- Não-recursivos: são filtros digitais com resposta ao impulso finita, e além disso possuem coeficientes constantes e utilizam janela de dados com comprimento finito. Outra característica

é que seus resultados de saída dependem apenas das amostras contidas na janela de dados (SILVA, 2009 p.6). Com relação ao tipo de janela, é possível ainda distinguir esse grupo em:

a) Janelas Fixas: que como o próprio nome diz, o algoritmo não modifica o tamanho da janela de dados. Esse subgrupo ainda pode ser classificado em relação ao tamanho da janela de dados, definindo conjuntos de:

i) Janelas Curtas: que calculam o fasor com a necessidade de poucas amostras do sinal. Esses algoritmos apresentam rapidez no processamento, porém, susceptível a erros significativos caso exista a presença das harmônicas e da componente CC de decaimento exponencial (SILVA, 2009 p.7).

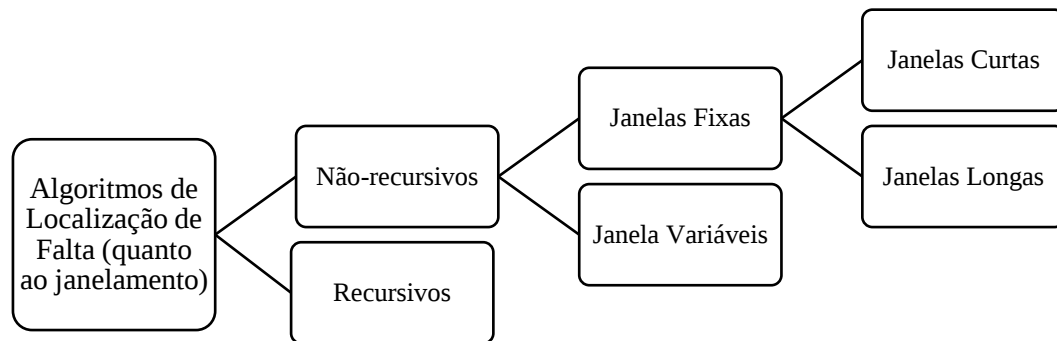
ii) Janelas Longas: que determinam o fasor utilizando um número de amostras a partir de meio ciclo da frequência fundamental do sinal. Algoritmos dessa natureza são menos propícios a erros devido a presença de harmônicas e da componente CC de decaimento exponencial, por outro lado, necessitam de mais tempo de processamento em virtude da grande janela de dados (SILVA, 2009 p.7).

b) Janelas Variáveis: esses métodos utilizam uma estratégia de adaptação do tamanho da janela de dados após uma falta, procurando ser mais rápido que um algoritmo de janela longa e mais preciso que um algoritmo de janela curta (SILVA, 2009 p.7).

2- Recursivos: implementam filtros digitais com resposta ao impulso infinita, com a característica que seus resultados de saída dependem das entradas atuais e das anteriores. Aplica-se um fator de esquecimento nesses métodos com a intenção de diminuir a influência das amostras anteriores e dar ênfase nas amostras atuais. O cálculo torna-se recursivo devido a utilização dos dados anteriores, o que propicia um esforço computacional menor (SILVA, 2009 p.7).

A Figura 2 mostra a disposição de cada grupo e subgrupo apresentados em um organograma para melhor entendimento do leitor.

Figura 2 - Classificação dos algoritmos de localização de faltas em relação ao janelamento de dados



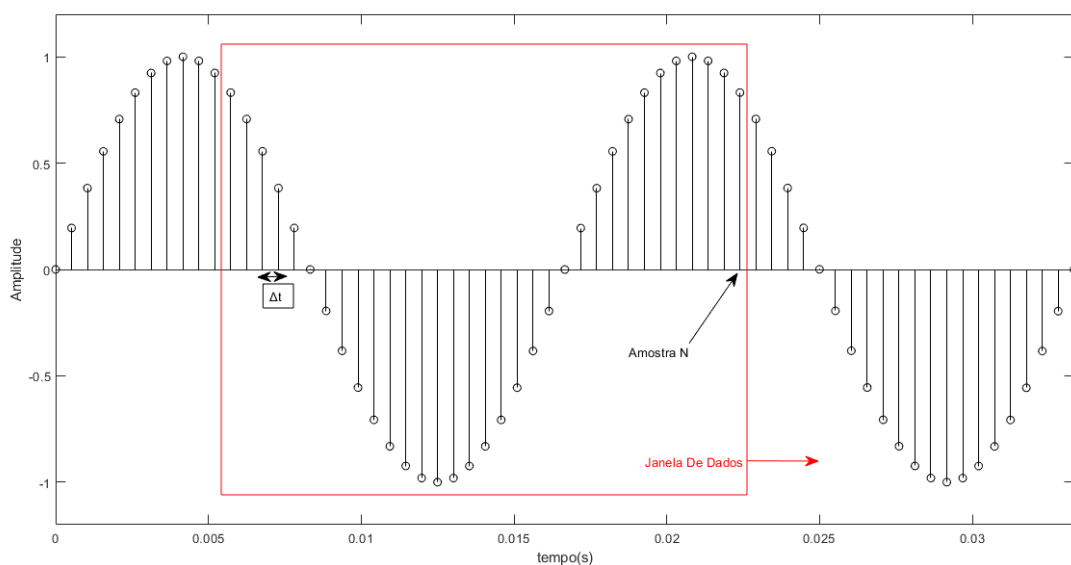
Fonte: Autoria Própria (2020)

2.1.1. Janela Deslizante de Amostragem

No momento em que uma nova amostra torna-se disponível (após um intervalo de amostragem), descarta-se a mais antiga e novamente o algoritmo recalcula os fasores. Esse processo de atualização das janelas de dados é conhecido como janela deslizante de amostragem (MASCHER, 2010 p.61).

A Figura 3 exemplifica o conceito apresentado de janela deslizante, onde o sinal é discretizado a uma taxa Δt e provém de uma janela de dados que agrupa N amostras. Com o decorrer do tempo de amostragem, novas amostras vão surgindo e a janela de dados desliza na indicação temporal, fazendo com que a amostra mais antiga seja descartada e a amostra atual seja agrupada a janela de dados.

Figura 3 - Janela Deslizante de Amostragem



Fonte: Autoria Própria (2020)

No sentido temporal, a cada nova janela de dados que é apresentada, o processo de estimação fasorial procura encontrar novos fasores com mais propriedade, cabendo aos algoritmos minimizar os erros de estimação (SILVA, 2013, p.12).

2.2.FONTES DE ERROS NOS MÉTODOS DE ESTIMAÇÃO FASORIAL

Os métodos de estimação fasorial possuem algumas fontes de erros que podem ocasionar em previsões de amplitude e ângulo de fase equivocadas, principalmente na estimação do fasor da componente fundamental do sinal. De acordo com Phadke e Thorp (2009, p.142), essas imprecisões na estimação do fasor são causadas basicamente pela componente CC de decaimento exponencial e por componentes de alta frequência.

2.2.1. Componente CC de Decaimento Exponencial

Durante uma operação em um circuito misto RL ou em um curto-circuito no sistema, a corrente $i(t)$ tem o perfil matemático mostrado na Equação 1, onde é dada por uma combinação de uma componente alternada $i_{ca}(t)$ e uma componente contínua $i_{cc}(t)$, conhecida essa como componente CC de decaimento exponencial (GLOVER; SARMA; OVERBYE, 2010). A Equação 2 e a Equação 3 mostram, respectivamente a descrição algébrica para cada parcela do sinal.

$$i(t) = i_{ca}(t) + i_{cc}(t) \quad (1)$$

$$i_{ca}(t) = \sqrt{2} \cdot I_m \cdot \text{sen}(\omega t + \alpha - \theta) \quad (2)$$

$$i_{cc}(t) = -\sqrt{2} \cdot I_m \cdot \text{sen}(\alpha - \theta) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (3)$$

Onde: I_m - Amplitude do sinal de corrente

ω – Frequência angular do sinal (rad/s)

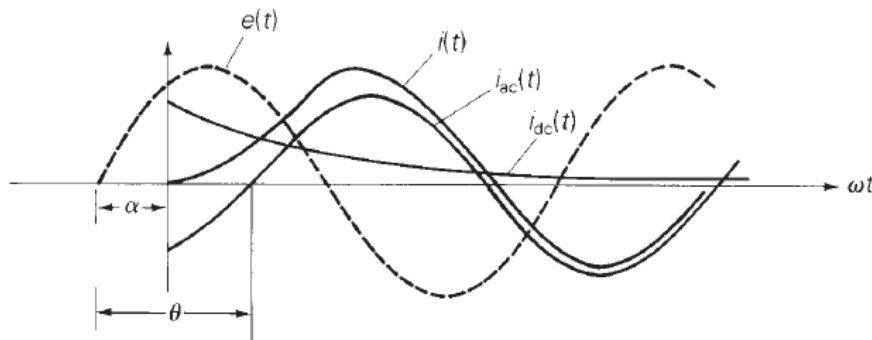
α – Diferença angular entre a tensão e corrente do circuito (rad)

$\theta = \tan^{-1} \frac{X}{R}$ no qual X é a reatância do circuito e R é a resistência do circuito (rad)

τ – constante de tempo do sinal (ciclos)

A Figura 4 mostra o comportamento de uma corrente de curto-circuito em uma linha de transmissão, dando ênfase ao comportamento individual e combinado das componentes CA e CC da corrente elétrica. Percebe-se o comportamento de decaimento exponencial da componente CC do sinal.

Figura 4-Comportamento dos sinais elétricos em um curto-circuito



Fonte: Glover, Sarma e Overbye (2010)

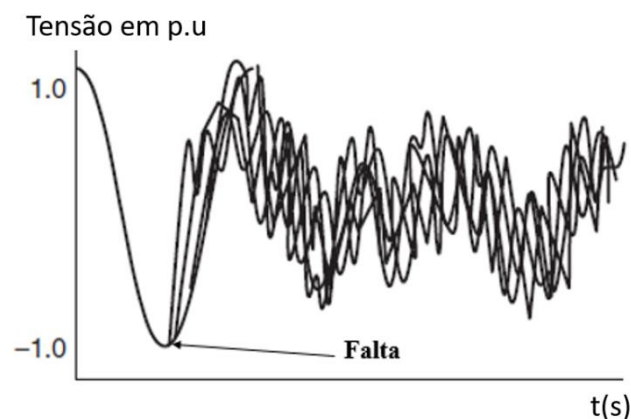
A componente CC de decaimento exponencial não é um erro para algoritmos baseados nas equações diferenciais da linha de transmissão e caso a constante de tempo (τ) seja conhecida, é possível remover essa componente CC com filtro externo ou através de um *software* (PHADKE; THORP, 2009 p.142).

2.2.2. Componentes de Alta Frequência

Alguns componentes e determinadas situações de faltas no sistema elétrico introduzem sinais de alta frequência na rede elétrica (PHADKE; THORP, 2009 p.143). Esses sinais de alta frequência representam harmônicos no espectro do sinal (seja tensão e corrente elétrica), modificando a natureza da onda e dificultando assim a precisão dos algoritmos de estimação fasorial.

A Figura 5 ilustra uma falta ocorrida e a modificação da natureza do sinal de tensão em virtude da inserção de componentes de alta frequência. De acordo com Phadke e Thorp (2009, p.143), esse conteúdo de alta frequência pode ser reduzido com uso de um filtro anti-aliasing.

Figura 5-Componentes de alta frequência em um sinal de tensão elétrica



Fonte: Adaptado de Phadke e Thorp (2009)

2.3. ALGORITMOS BASEADOS NA SÉRIE DE FOURIER

A Série Trigonométrica de Fourier, mostrada na Equação 4, descreve que um sinal de natureza periódica $x(t)$ com um período T_0 pode ser descrito através de um somatório de funções senoidais com frequência fundamental, juntamente com suas harmônicas (LATHI, 2007 p.530).

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cdot \cos(n \cdot \omega_0 \cdot t) + b_n \cdot \sin(n \cdot \omega_0 \cdot t)] \quad (4)$$

Onde: ω_0 - Frequência angular fundamental

a_0 - componente CC do sinal

a_n e b_n - coeficientes da harmônica n

Os valores dos coeficientes da Série de Fourier (a_0 , a_n e b_n) podem ser determinados através das Equações 5 e 6, como mostrado abaixo. Vale salientar que a harmônica $n = 0$ representa o valor CC agregado ao sinal e a harmônica $n = 1$ representa a frequência fundamental do sinal. Todas as outras são harmônicas múltiplas da frequência fundamental.

$$a_n = \frac{2}{T_0} \int_{T_0} x(t) \cdot \cos(n \cdot \omega_0 \cdot t) \quad \text{para } n = 0, 1, 2, \dots \quad (5)$$

$$b_n = \frac{2}{T_0} \int_{T_0} x(t) \cdot \sin(n \cdot \omega_0 \cdot t) \quad \text{para } n = 1, 2, \dots \quad (6)$$

Onde: ω_0 - Frequência angular fundamental

T_0 - período fundamental da forma de onda

A Série de Fourier também permite ser escrita em sua forma compacta, como mostra a Equação 7.

$$x(t) = C_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [C_n \cdot \cos(n \cdot \omega_0 \cdot t + \theta_n)] \quad (7)$$

Onde:

$$C_0 = \frac{a_0}{2}, \quad C_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad \text{e} \quad \theta_n = \tan^{-1}\left(\frac{-b_n}{a_n}\right)$$

2.3.1. Algoritmo de Fourier de Ciclo Completo (AFCC)

Este algoritmo procura estimar o fasor das harmônicas de uma forma de onda estudada, considerando 1 ciclo de amostras desse mesmo sinal. Porém, a análise que antes estava no tempo contínuo $x(t)$, agora deve ser discretizada $x(k)$, visto que a análise agora considera um determinado ciclo finito de amostras e um tempo de amostragem definido.

Ao considerar N como a quantidade de amostras por ciclo da componente fundamental, t_N como o tempo da n -ésima amostra, Δt como o intervalo de análise e $T = N \cdot \Delta t$, os termos a_n e b_n antes definidos no domínio do tempo contínuo pelas Equações 5 e 6, podem ser reescritos como mostra as Equações 8 e 9. Como a análise é voltada para o tempo discreto (por amostragem), é conveniente substituir o operador integral por somatórios finitos.

$$a_n = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x(k) \cdot \cos\left(\frac{n \cdot 2\pi \cdot k}{N}\right) = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x(k) \cdot h_x(n) \quad (8)$$

$$b_n = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x(k) \cdot \sin\left(\frac{n \cdot 2\pi \cdot k}{N}\right) = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x(k) \cdot h_y(n) \quad (9)$$

Onde: k – Amostras analisadas

n – Harmônicas do sinal

h_x – Coeficiente real do Filtro de Fourier de Ciclo Completo

h_y – Coeficiente imaginário do Filtro de Fourier de Ciclo Completo

O fasor de qualquer harmônica do sinal $X(n) \angle \theta(n)$ é um número complexo da forma $X(n) = X_{re}(n) + j \cdot X_{im}(n)$. Considerando as Equações 8 e 9 como combinação de um número complexo, torna-se possível estimar o fasor do sinal, para qualquer harmônica n , através das Equações 10 e 11.

$$X_{re}(n) = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x(k) \cdot \cos\left(\frac{n \cdot 2\pi \cdot k}{N}\right) \quad (10)$$

$$X_{im}(n) = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x(k) \cdot \sin\left(\frac{n \cdot 2\pi \cdot k}{N}\right) \quad (11)$$

O módulo do fasor da componente $|X(n)|$ e o ângulo de fase $\theta(n)$ podem ser retirados de uma simples interpretação fasorial, como mostram as Equações 12 e 13. A abordagem

principal desse método consiste em obter o fasor da harmônica fundamental e assim, todas as equações aqui apresentadas, podem ser particularizadas para $n = 1$.

$$|X(n)| = \sqrt{X_{re}(n)^2 + X_{im}(n)^2} \quad (12)$$

$$\theta(n) = \tan^{-1} \left(-\frac{X_{im}(n)}{X_{re}(n)} \right) \quad (13)$$

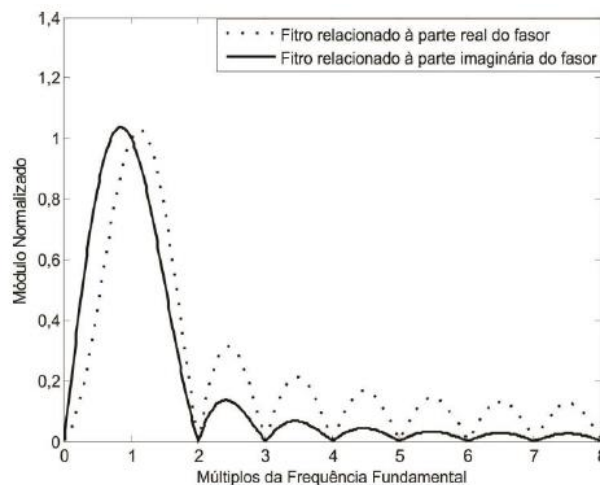
Os parâmetros h_x e h_y são definidos respectivamente como coeficientes real e imaginário do Filtro de Fourier de Ciclo Completo, para cada harmônica n , descritos nas Equações 14 e 15. Uma característica desse método de estimação fasorial é o fato que os filtros h_x e h_y são ortogonais para a frequência fundamental e além disso, podem ser calculados de modo *off-line* (SILVA,2009 p.53).

$$h_x(n) = \frac{2}{N} \left[1 \cos\left(\frac{n \cdot 2\pi \cdot k_0}{N}\right) \cos\left(\frac{n \cdot 2\pi \cdot k_1}{N}\right) \dots \cos\left(\frac{n \cdot 2\pi \cdot k_{N-1}}{N}\right) \right] \quad (14)$$

$$h_y(n) = \frac{2}{N} \left[0 \sin\left(\frac{n \cdot 2\pi \cdot k_0}{N}\right) \sin\left(\frac{n \cdot 2\pi \cdot k_1}{N}\right) \dots \sin\left(\frac{n \cdot 2\pi \cdot k_{N-1}}{N}\right) \right] \quad (15)$$

A partir das Equações 14 e 15, torna-se possível calcular o ganho das respostas em frequência de cada coeficiente do filtro (real ou imaginário), como mostra a Figura 6. É possível observar que os módulos possuem ganho unitário na frequência fundamental e ganho nulo nas outras frequências múltiplas. Ou seja, esses filtros eliminam todas as harmônicas, a não ser a fundamental, de um sinal (SILVA,2009 p.68).

Figura 6- Ganho das respostas em frequência para o AFCC



Fonte: Campos (2016)

2.3.2. Algoritmo de Fourier de Meio Ciclo (AFMC)

O Algoritmo de Fourier de Meio Ciclo trabalha com uma janela de dados reduzida, de meio ciclo de dados, promovendo intuitivamente, rapidez na estimação do fasor se comparado ao AFCC (MASCHER,2010 p.84).

As Equações 16 e 17 mostram como podem ser calculadas as parcelas reais $X_{re}(n)$ e imaginárias $X_{im}(n)$ dos fasores das harmônicas para esse algoritmo. Novamente, para encontrar o módulo do fasor da componente $|X(n)|$ e o ângulo de fase $\theta(n)$ basta uma simples interpretação fasorial, como mostram as Equações 12 e 13. Em busca da harmônica fundamental, basta individualizar o estudo para $n = 1$.

$$X_{re}(n) = \frac{4}{N} \sum_{k=0}^{\frac{N}{2}-1} x(k) \cdot \cos\left(\frac{n \cdot 2\pi \cdot k}{N}\right) = \frac{4}{N} \sum_{k=0}^{\frac{N}{2}-1} x(k) \cdot h_x(n) \quad (16)$$

$$X_{im}(n) = \frac{4}{N} \sum_{k=0}^{\frac{N}{2}-1} x(k) \cdot \sin\left(\frac{n \cdot 2\pi \cdot k}{N}\right) = \frac{4}{N} \sum_{k=0}^{\frac{N}{2}-1} x(k) \cdot h_y(n) \quad (17)$$

Onde: k – Amostras analisadas

n – Harmônicas do sinal

h_x – Coeficiente real do Filtro de Fourier de Meio Ciclo

h_y – Coeficiente imaginário do Filtro de Fourier de Meio Ciclo

Os parâmetros h_x e h_y são definidos respectivamente como coeficientes real e imaginário do Filtro de Fourier de Meio Ciclo, para cada harmônica n , descritos nas Equações 18 e 19.

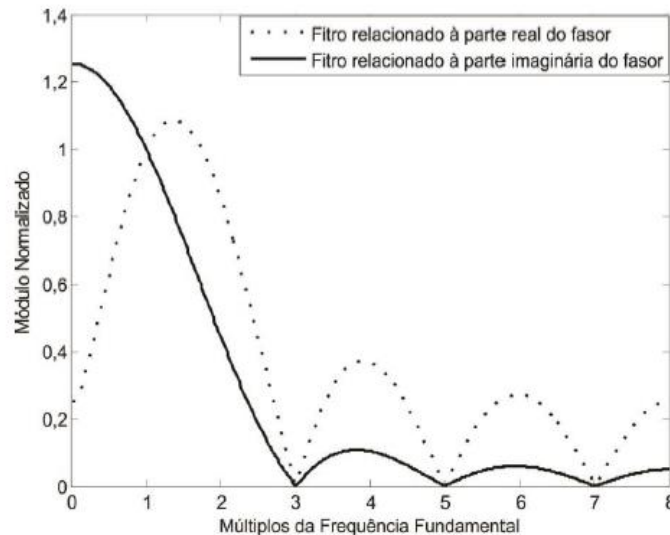
$$h_x(n) = \frac{4}{N} \left[1 \cos\left(\frac{n \cdot 2\pi \cdot k_0}{N}\right) \cos\left(\frac{n \cdot 2\pi \cdot k_1}{N}\right) \dots \cos\left(\frac{n \cdot 2\pi \cdot k_{\frac{N}{2}-1}}{N}\right) \right] \quad (18)$$

$$h_y(n) = \frac{4}{N} \left[0 \sin\left(\frac{n \cdot 2\pi \cdot k_0}{N}\right) \sin\left(\frac{n \cdot 2\pi \cdot k_1}{N}\right) \dots \sin\left(\frac{n \cdot 2\pi \cdot k_{\frac{N}{2}-1}}{N}\right) \right] \quad (19)$$

A partir das Equações 18 e 19, torna-se possível calcular o ganho das respostas em frequência de cada coeficiente do filtro (real ou imaginário), como mostra a Figura 7. Observa-se que os Filtros de Fourier de Meio Ciclo possuem: ganho nulo para as harmônicas ímpares

(diferentes da fundamental) e ganho não nulo para as harmônicas de ordem par, incluindo a componente CC do sinal ($n = 0$).

Figura 7 - Ganho das respostas em frequência para o AFMC



Fonte: Campos (2016)

Este método promove rapidez na estimação do fasor, se comparado ao AFCC, porém não rejeita satisfatoriamente a componente CC de decaimento exponencial e as harmônicas pares (MASCHER, 2010 p.84). Existe a dificuldade de eliminar a componente CC de decaimento exponencial devido ao seu comportamento aperiódico possuindo um espectro de frequência relativamente amplo, o que acaba introduzindo erros de estimação (CAMPOS, 2016 p.11).

2.4. FILTRO COSSENO (FCOS)

Schweitzer e Hou (1992) desenvolveram um método, nomeado como Filtro Cosseno (FCOS), sendo uma otimização do Algoritmo de Fourier de Ciclo Completo. No método AFCC utilizavam-se de dois filtros ortogonais entre si na frequência fundamental, sendo eles: o filtro cosseno, auxiliando na determinação do coeficiente real do filtro (h_x) e o filtro seno, auxiliando na definição do coeficiente imaginário do filtro (h_y).

No Método do Filtro Cosseno, calcula-se o coeficiente real do filtro h_x através da função cosseno e para manter o princípio da ortogonalidade, calcula-se o coeficiente imaginário do filtro h_y através da função cosseno com as amostras defasadas em 90° (sendo equivalente a uma função seno), ou seja, defasado com um quarto do ciclo completo (CAMPOS, 2016 p.11; MASCHER, 2010 p.65).

As Equações 20 e 21 exibem as expressões utilizadas para encontrar a porção real $X_{re}(n)$ e imaginárias $X_{im}(n)$ dos fasores das harmônicas para o Método do Filtro Cosseno. O fasor pode ser determinado fazendo uso das Equações 12 e 13 para encontrar o módulo e o ângulo de fase do sinal estudado. Em busca da harmônica fundamental, basta individualizar o estudo para $n = 1$.

$$X_{re}(n) = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x(k) \cdot \cos\left(\frac{n \cdot 2\pi \cdot k}{N}\right) \quad (20)$$

$$X_{im}(n) = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x\left(k + \frac{N}{4}\right) \cdot \cos\left(\frac{n \cdot 2\pi \cdot k}{N}\right) \quad (21)$$

Ao utilizar o Método do Filtro Cosseno, obteve-se um bom desempenho no processo de eliminação da componente CC de decaimento exponencial, e por outro lado, existe um atraso de um quarto de ciclo na estimação do fasor (CAMPOS,2016 p.12).

2.5. FILTRO COSSENO MODIFICADO (FCSM)

O atraso de um quarto de ciclo causado pelo Método do Filtro Cosseno fez com que Hart et al. (2000) desenvolvesse um novo perfil para o filtro, denominado Filtro Cosseno Modificado (CAMPOS,2016, p.12). Dessa forma, um atraso que antes era de um quarto de ciclo, é reduzido para apenas uma única amostra (OLIVEIRA; SOUZA,2012 p.2).

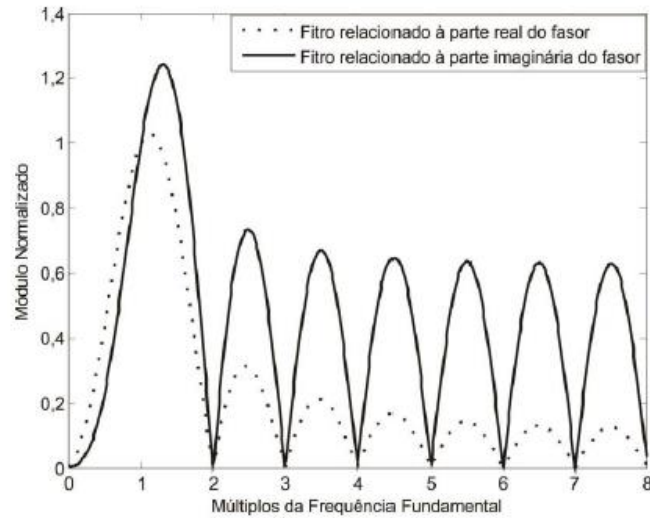
As Equações 22 e 23 apresentam como encontrar, respectivamente, as parcelas real e imaginária do fasor para a frequência fundamental ($n = 1$).

$$X_{re}(k) = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x(k) \cdot \cos\left(\frac{2\pi \cdot k}{N}\right) \quad (22)$$

$$X_{im}(k) = \frac{X_{re}(k-1) \cos\left(\frac{2\pi}{N}\right) - X_{re}(k)}{\sin\left(\frac{2\pi}{N}\right)} \quad (23)$$

A resposta em frequência do Filtro Cosseno Modificado é mostrada na Figura 8. Segundo Campos (2016, p.12), o filtro possui ganhos elevados para harmônicas em alta frequência, e atenuação significativa para baixas frequências (reduzindo a contribuição da componente CC de decaimento exponencial).

Figura 8 - Ganho das respostas em frequência para o COSM



Fonte: Campos (2016)

2.6. ALGORITMO DE GUO, KEZUNOVIC E CHEN (AGKC)

Nesse método, é proposto um algoritmo capaz de atenuar a componente CC de decaimento exponencial de um sinal, utilizando janelamentos recursivos, onde sua reposta depende das amostras atuais e das anteriores (CAMPOS,2016 p.13). Guo, Kezunovic e Chen (2003, p.714), propuseram as Equações 24, 25, 26 e 27 que permeiam o desenvolvimento do algoritmo.

$$X_{re\,atual}(n) = X_{re}(n) \quad (24)$$

$$X_{im\,atual}(n) = X_{im}(n) + \frac{2}{N} \cot g \left(\frac{\pi n}{N} \right) (PS_2 - PS_1) \quad (25)$$

$$PS_1 = \sum_{k=0}^{\frac{N}{2}} x(2k - 1) \quad (26)$$

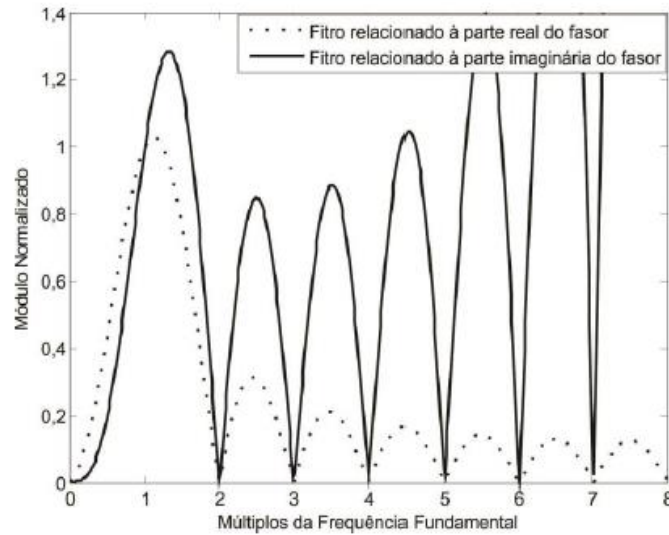
$$PS_2 = \sum_{k=0}^{\frac{N}{2}} x(2k) \quad (27)$$

As Equações de PS_1 e PS_2 fazem parte do processo de estimação e representam, respectivamente, o somatório das amostras ímpares e pares contidas dentro da janela de dados. Esses somatórios, de acordo com o método aplicado por AGKC auxiliam na estimação da parte imaginária do fasor.

Os cálculos de $X_{re}(n)$ e $X_{im}(n)$ podem ser realizados utilizando os princípios do Algoritmo de Fourier de Ciclo Completo, mostradas nas Equações 10 e 11. A resposta em frequência do Algoritmo de Guo, Kezunovic e Chen é mostrada na Figura 9. Fazendo o estudo para o ganho das respostas em frequência para esse filtro é possível afirmar que a parte real do filtro apresenta ganho nulo para as harmônicas diferentes da fundamental.

Já a parcela imaginária do filtro apresenta ganho nulo para as harmônicas diferentes da fundamental, exceto pela oitava harmônica. Como afirma Campos (2016, p.13), esse algoritmo não elimina completamente a oitava harmônica em seu processo de filtragem.

Figura 9 - Ganho das respostas em frequência para o AGKC



Fonte: Campos (2016)

2.7. FILTRO MÍMICO DIGITAL PROPOSTO POR BENMOUYAL (MIMIC)

Benmouyal (1995) fundamentou seu estudo nos princípios dos relés eletromecânicos para propor um filtro a ser empregado em relés digitais, denominado Filtro Mimico Digital. Esse filtro é basicamente um circuito do tipo RL, onde a relação L/R é idealizada na intenção de reduzir a componente CC de decaimento exponencial na operação do relé (SILVA, 2009 p.61).

Nesse método, o sinal de saída em tempo amostrado, $x_f(k)$, apresenta uma resposta atenuada com relação a componente CC de decaimento exponencial, se comparado ao seu sinal original $x(k)$, da forma mostrada pela Equação 28.

$$x_f(k) = K[(1 + \tau_d)x(k) - \tau_d \cdot x(k - 1)] \quad (28)$$

Onde: K – ganho do filtro mímico

τ_d – constante de tempo do filtro mímico (em ciclos)

O parâmetro τ_d também é conhecido como a constante de tempo da linha de transmissão (LT) protegida e seu valor depende das características dessa LT, como mostra a Equação 29 (MACHADO, 2013 p.57).

$$\tau_d = \frac{L_1/R_1}{\Delta t} \quad (29)$$

Onde : L_1 – indutância de sequência positiva da linha de transmissão protegida

R_1 – resistência de sequência positiva da linha de transmissão protegida

Δt – tempo de amostragem do sinal

Compreendendo a Equação 28 como a representação de um filtro para inibir a componente CC de decaimento exponencial, aplica-se a Transformada Z nessa equação com intuito de obter a função de transferência no domínio discreto desse filtro. A Equação 30 enuncia o Filtro Mímico no domínio discreto.

$$\frac{X_f(z)}{X(x)} = K[(1 + \tau_d) - \tau_d \cdot z^{-1}] \quad (30)$$

Aplicando as operações modulares na Equação 30, com intuito de encontrar o valor do ganho do filtro, tem-se o que se mostra na Equação 31. Aplicando os conceitos de números complexos, separando a parte real e imaginária do fasor, é possível retirar a expressão do módulo da Equação 31, como apresenta a Equação 32.

$$\left| \frac{X_f(z)}{X(x)} \right| = |K[(1 + \tau_d) - \tau_d \cdot e^{-j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \Delta t}]| \quad (31)$$

$$\left| \frac{X_f(z)}{X(x)} \right| = K \cdot \sqrt{[(1 + \tau_d) - \tau_d \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f \cdot \Delta t)]^2 + [\tau_d \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot \Delta t)]^2} \quad (32)$$

De acordo com Benmouyal (1995, p.625), o ganho K do filtro deve ter valor unitário para a frequência fundamental do sinal e o valor de τ_d deve ser escolhido de modo a atenuar o impacto da componente CC de decaimento exponencial no sinal. Fazendo o ganho $\left| \frac{X_f(z)}{X(x)} \right|$ ser unitário, aplicando-se a frequência fundamental ($f = 60Hz$) e isolando o valor de K , obtém-se a expressão geral do cálculo do ganho, mostrada na Equação 33.

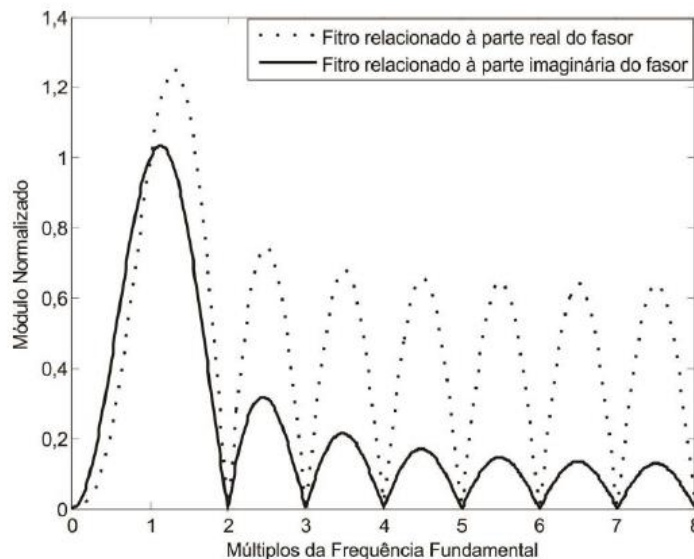
$$K(60Hz) = \frac{1}{\sqrt{[(1 + \tau_d) - \tau_d \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot 60 \cdot \Delta t)]^2 + [\tau_d \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 60 \cdot \Delta t)]^2}} \quad (33)$$

Além disso, caso o valor de τ_d seja numericamente igual ao valor da constante de tempo da componente CC de decaimento exponencial do sinal ($\tau_d = \tau$), essa componente CC é eliminada por completo (BENMOUYAL, 1995 p.628). Dessa forma, uma dificuldade para utilização desse método é ter o conhecimento prévio da constante de tempo da componente CC de decaimento exponencial (τ).

Dessa forma, pode-se definir o Filtro Mimico Digital como um filtro passa-alta de característica elíptica, responsável por mitigar os espectros de baixa frequência, porém com a característica de amplificar espectros de frequências maiores que a fundamental (MACHADO, 2013, p.57-58).

O Filtro Mimico, por si só não estima fasores de sinais e assim, necessita ser combinado com algum método de estimação fasorial para ser utilizado. A Figura 10 apresenta os ganhos das respostas em frequência do Algoritmo de Fourier de Ciclo Completo acoplado ao Filtro Mímico Digital. Percebe-se que, se comparado a Figura 5, o ganho atenua-se nas baixas frequências e apresenta ganhos elevados nas frequências maiores que a fundamental.

Figura 10 - Ganho das respostas em frequência para AFCC acoplado ao Filtro Mimico Digital



Fonte: Campos (2016)

2.8. ÍNDICES DE DESEMPENHO DA ESTIMAÇÃO FASORIAL

Um sinal qualquer, amostrado no tempo $x(k)$, pode ser apresentado através da Equação 34, sendo formado por uma componente alternada (evidenciada através da função cosseno) e por uma componente contínua (indicada pelo termo de decaimento exponencial).

$$x(k) = \sum_{k=0}^{NT-1} \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot k}{N}\right) - e^{\frac{-\Delta t \cdot k}{\tau}} \quad (34)$$

Onde: NT – número total de amostras

Δt – intervalo de amostragem

τ – constante de tempo da componente CC de decaimento exponencial

Com a intenção de avaliar a performance da técnica de estimação fasorial, são definidos índices de desempenhos (ID_s) para esse propósito. Foi considerado nesses índices, as oscilações de saída em regime permanente, o percentual de *overshoot* e a velocidade de convergência dos filtros analisados. (OLIVEIRA; SOUZA, 2012 p.2).

Os índices de desempenho (ID_s) para esse trabalho não levam em consideração a sensibilidade dos filtros das técnicas de estimação a variações da constante de tempo do sinal (τ). Dessa forma, cada índice é calculado para um valor fixo de constante de tempo.

2.8.1. Índice de Desempenho 1 (ID_1)

De acordo com Benmouyal (1995, p. 621), deve-se subentender que um fasor normalizado $y(t)$ atinja um valor estacionário de 1, porém oscile em torno dessa medida. Pensando nisso, o Índice ID_1 , desenvolvido por Benmouyal (1995), mensura o comportamento do filtro com relação a essas oscilações em torno do valor em estado permanente.

A Equação 35, apresentada em Oliveira e Souza (2012, p.3), evidencia a expressão que define o Índice de Desempenho (ID_1) em função do sinal discreto, levando em considerações seus valores a cada amostra k .

$$ID_1(\tau) = \sum_{k=T_0}^{NT-1} [1 - y(k)]^2 \quad (35)$$

Onde: $y(k)$ – magnitude estimada do fasor para amostra $x(k)$

$y(T_0)$ – primeira magnitude estimada do fasor a ultrapassar o valor de regime permanente

A interpretação do Índice de Desempenho 1 (ID_1) se apresenta na forma de, quanto menor for o valor do Índice ID_1 , menores são as oscilações em torno do valor de sua resposta em regime permanente. (BENMOUYAL, 1995, p.621-622).

2.8.2. Índice de Desempenho 2 (ID_2)

Com o intuito de avaliar o *overshoot* ocasionado por um método de estimação fasorial, Benmouyal (1995) definiu o Índice de Desempenho 2 (ID_2). Nesse índice, é necessário conhecer o máximo valor atingido pelo fasor no método e subtraí-lo do seu valor em regime estacionário (que é considerado unitário quando normalizado), como mostra a Equação 36.

$$ID_2(\tau) = \max(y(k) - 1) * 100 \quad (36)$$

O Índice de Desempenho 2 (ID_2) é dado em porcentagem e quanto menor seu valor, menor a taxa percentual de *overshoot* do método no processo de estimação fasorial (BENMOUYAL, 1995, p.622).

2.8.3. Índice de Desempenho 3 (ID_3)

O Índice de Desempenho 3 (ID_3), exposto por Balamourougan e Sidhu (2006), apresenta a performance do algoritmo de estimação fasorial com relação a velocidade de convergência. (BALAMOUROUGAN; SHIDU, 2006 p.4). A Equação 37 exhibe essa relação em função da quantidade de termos necessários para se obter a convergência (n_{conv}) em função do número de amostras por ciclo do sinal (N).

$$ID_3(\tau) = \frac{n_{conv} - N}{N} \quad (37)$$

Para um método de estimação fasorial convergir, é interessante que seu valor não se modifique e permaneça inalterado no regime estacionário. Devido aos métodos iterativos dos algoritmos de estimação, mesmo em regime permanente, existe pequenas variações atribuídas aos fasores e torna-se necessário definir um tempo de acomodação para convergência.

O tempo de acomodação é definido como o tempo necessário para a resposta atingir e permanecer dentro de uma tolerância de 2% do seu valor final (NISE, 2013 p.251). Dessa forma, para deixar o tempo de acomodação confiável (no caso, a quantidade amostras), foi considerado nesse trabalho a convergência se o tempo de acomodação do sinal estiver na faixa de $\pm 0,5\%$.

3. FUNDAMENTOS DA LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

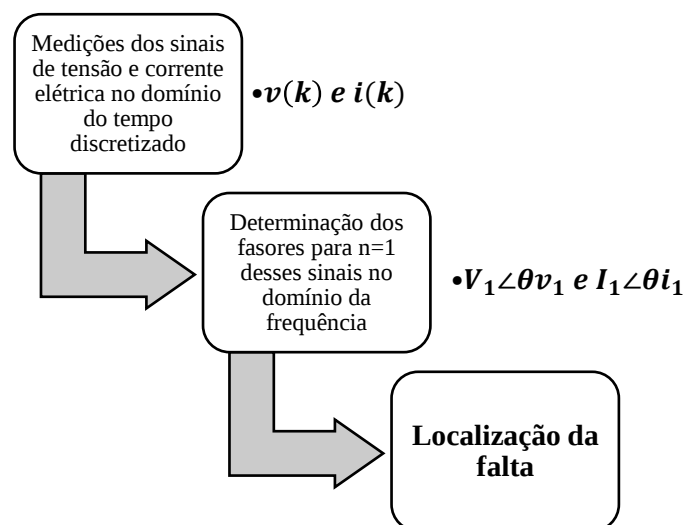
Localizar uma falta em uma linha de transmissão é algo primordial com intuito de manter a continuidade e qualidade do serviço elétrico prestado, pois durante um defeito elétrico, são necessários a atuação de reparo físico e o deslocamento do profissional da área até o local. Quanto mais rápido e precisa a localização for, mais rápido o sistema será reestabelecido.

As principais técnicas de localização de falta baseiam-se principalmente em dois grandes conjuntos, sendo eles os métodos que utilizam os fasores das componentes fundamentais dos sinais e os métodos que utilizam dos transitórios propiciados pela falta elétrica baseado na teoria de ondas viajantes.

Grande parte dos métodos de localização de faltas baseiam-se na estimação de fasores das componentes fundamentais do sinal, devido ao fato de poder utilizar dados que foram registrados dos sinais de tensão e corrente elétrica no sistema. O método de ondas viajantes, por sua vez, necessita de equipamentos específicos para operar, sendo esse um obstáculo para sua utilização (SANTO,2013 p.3).

As técnicas que utilizam os fasores das componentes fundamentais será o foco deste trabalho, devido a sua maior aplicabilidade em relés comerciais digitais. Esse método consiste basicamente em determinar os fasores para a componente fundamental ($n = 1$) dos sinais de tensão e corrente elétrica do sistema analisado e com isso, determinar a localização da falta elétrica. A Figura 11 mostra o princípio básico desse funcionamento.

Figura 11 - Funcionamento dos algoritmos de localização utilizando fasores das componentes fundamentais do sinal



Fonte: Autoria Própria (2020)

É lógico, portanto, que a precisão da localização da falta está atrelada também a precisão do algoritmo de estimação fasorial, além da sua própria técnica envolvida. Desse modo, técnicas que possuem a capacidade de eliminar componentes de alta frequência e atenuar a corrente CC de decaimento exponencial que podem ocorrer durante faltas elétricas, tendem a apresentar melhores resultados.

Diversos outros fatores podem introduzir erros na determinação do ponto de falta, tais como o não conhecimento da resistência de falta, a presença de linhas paralelas ou próximas, linhas não simétricas, dados não característicos das impedâncias das linhas, presença da compensação série e perfil não senoidal para dados pós-falta. (SILVEIRA, 2007 p.19).

O presente capítulo exhibe as premissas para compreensão da localização de faltas em linhas de transmissão, retratando a estrutura de um localizador de faltas, a sincronização de registros oscilográficos e o algoritmo para localização do ponto de início da falta. Além disso, ainda é apresentada a modelagem da matriz de impedância e admitância trifásica para linhas perfeitamente transpostas e, por último, índices de desempenho para as localizações encontradas através dos algoritmos.

3.1. ESTRUTURA DE UM LOCALIZADOR DE FALTAS

Um localizador de faltas apresenta a função de identificar o ponto de falta em uma linha de transmissão, visando o reparo do sinistro e a rápida restauração do fornecimento de energia, caso exista uma falha permanente.

Durante faltas transitórias, o localizador de faltas também atua no conhecimento de pontos “fracos” da linha de transmissão, visando evitar novos prejuízos ou aparecimento de faltas permanentes. (GAUTIER, 1996 p.1).

Devido à complexidade e tamanho das linhas de transmissão e dos sistemas, a necessidade de localizadores de faltas precisos tornou-se primordial para manter os parâmetros de qualidade do fornecimento, além de identificar possíveis danos físicos causados no local da falta. (COURY, 2002 apud GAUTIER, 1996 p.2).

O uso de componentes digitais na proteção dos sistemas de energia elétrica desenvolveu a área de localizadores de faltas, que passaram a contar com microprocessadores incorporados. Segundo Gautier (1996, p.2), esses localizadores digitais proporcionaram respostas mais precisas comparadas aos localizadores analógicos, além de não necessitar de manutenções sucessivas. Outra grande vantagem dos localizadores digitais se dá pelo modo como processam

os dados, de modo *off-line*, não se comportando devido a necessidade, por exemplo, dos próprios relés de proteção.

Silveira (2007, p.20) afirma que um localizador de falta digital pode ser implementado como um *hardware* no formato de um relé digital, ou como um *software* (ou um algoritmo) para detecção do ponto de falta com base nos dados obtidos por registradores digitais de perturbação (RDP) ou oscilografias da rede.

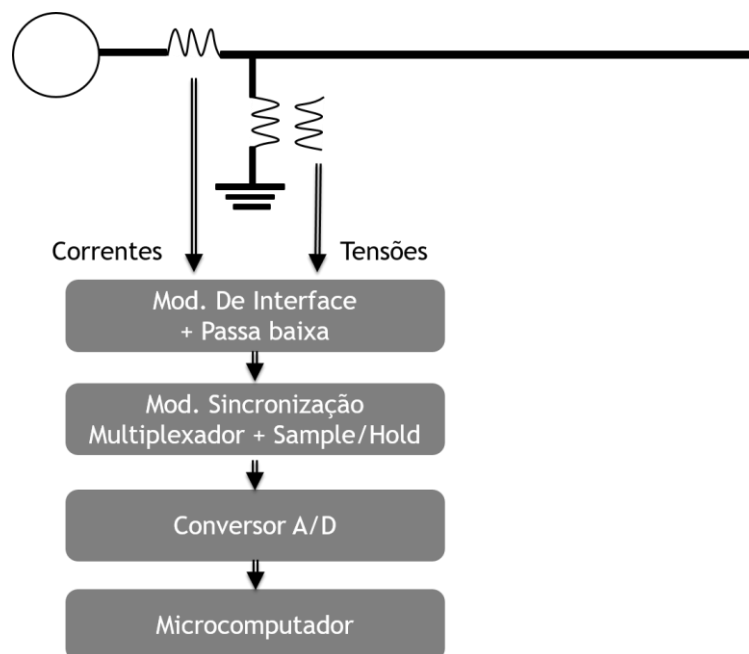
3.1.1. Localizador de Falta Digital como Hardware

Um localizador de falta digital como dispositivo, é formado basicamente como mostra a Figura 12. Primeiramente os sinais de tensão e corrente são lidos pelos transformadores de instrumentos (TCs e TP), propiciando nos seus secundários um perfil fiel (mas com amplitude proporcional) das medições da linha de transmissão protegida.

Esses sinais analógicos modulados a um valor proporcional passam por filtros analógicos (do tipo passa-baixa) para eliminação de altas frequências, posteriormente por circuitos de amostragem (*Sample-Hold*) e por Conversores Analógicos/Digitais (A/D).

Após a determinação dos dados digitais pelo Conversor A/D, os sinais são armazenados e enviados para os microcomputadores, onde o algoritmo de localização de faltas conduzirá a determinação da localização da falta com base nesses dados digitais registrados.

Figura 12 - Localizador de Falta Digital como Hardware



Fonte: Autoria Própria (2020)

3.1.2. Localizador de Falta Digital como *Software*

Nesse tipo de localizador, torna-se necessário os dados de tensão e corrente elétrica dos medidores (por registradores digitais de perturbação ou oscilografias da rede). Em posse dessas informações, aplica-se o algoritmo desejado, utilizando a técnica desejada, com intenção de se obter a localização de falta.

Como afirma Gautier (1996, p.5), esse software necessita de um meio de comunicação para transmissão dos dados necessários (sinais de tensão e corrente elétrica). Devido a não necessidade de dados de modo on-line, a comunicação torna-se simples e esse método bastante útil.

Porém, mesmo em posse dos dados das oscilografias da rede, ainda se torna necessário sincronizar esses dados entre os terminais medidores. De acordo com Cruz (2015, p.83), os equipamentos oscilográficos não apresentam a mesma base temporal e necessitam assim que os sinais apresentados nas oscilografias sejam sincronizados.

Gautier (1996, p.18) afirma que “ a localização de falta só poderá ser determinada precisamente se as medições em ambos os terminais forem sincronizadas”. Desse modo, a sincronização dos dados oscilográficos é de suma importância para uma boa determinação do ponto de falta.

3.2. SINCRONIZAÇÃO DE REGISTROS OSCILOGRÁFICOS

As oscilografias da rede apresentam dados de monitoramento dos sinais elétricos de tensão e corrente do sistema elétrico em determinados pontos da linha de transmissão. As unidades de medição fasorial, do inglês *Phasor Measurement Units* (ou PMU) agregam essa propriedade de sincronização dos dados, que ocorre através de um sistema de GPS (*Global Positioning Systems*) e propicia medições em dois terminais diferentes em uma mesma estampa de tempo (SILVA,2012 p.7).

Devido a necessidade de instalação de um sistema confiável de comunicação, a aplicação de PMUs pode se tornar bastante onerosa. Além disso, como maneira colaborativa ou substitutiva em casos de defeitos no sistema de comunicação via GPS nos PMUs, os métodos de sincronização de dados via *software* aparecem com alternativa para resolver o erro temporal que existem entre os medidores (CRUZ,2015 p.83).

Os métodos de sincronização de dados via *software*, podem se apresentar baseados em estudos de componentes transitórias ou comparação de amostras, além do que as principais

técnicas escolhidas são as que realizam a comparação de dois ciclos sucessivos e a Transformada Wavelet Discreta (TWD). Outros métodos também podem utilizar de fasores de tensão e corrente pré-falta para sincronização de dados, que dependem das características elétricas da linha de transmissão. (CRUZ,2015 p.84-87).

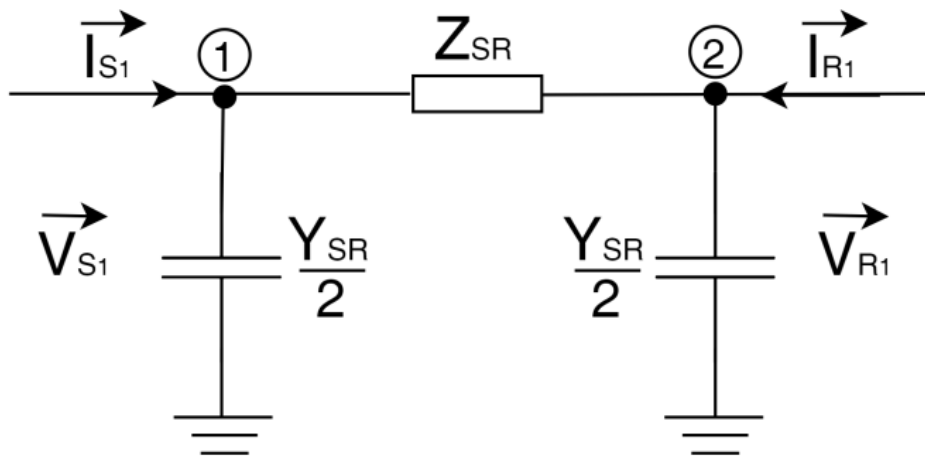
O algoritmo de sincronização de dados que será utilizado nesse trabalho, desenvolvido por Monteiro et al. (2018), é uma adaptação da metodologia proposta por Cruz et al. (2016), com as características de não ser sensível às condições de operação do sistema, independente das características transitórias dos sinais de falta, depender apenas dos fasores de tensão e corrente elétrica pré-falta e ser independente dos parâmetros elétricos da linha de transmissão (MONTEIRO, 2018 p.2).

3.2.1. Sincronização de dados proposta por Monteiro et al. (2018)

A técnica proposta por Monteiro et al. (2018) para desenvolvimento das equações de sincronização, baseia-se na metodologia proposta por Cruz et al. (2016), que faz uso dos circuitos de sequência positiva da linha de transmissão em circunstâncias pré-falta. A Figura 13 apresenta esse circuito de sequência positiva com dois terminais de medições, sendo eles o terminal local (S) e o terminal Remoto (R).

As grandezas $\vec{V}_{S1}$, $\vec{I}_{S1}$, $\vec{V}_{R1}$ e $\vec{I}_{R1}$ representam os fasores de sequência positiva dos sinais de corrente de cada terminal em situações pré-falta, além do que, Z_{SR} e Y_{SR} descrevem respectivamente as componente de sequência positiva da impedância série e da admitância *shunt* da linha de transmissão.

Figura 13 - Circuito equivalente de sequência positiva de uma linha de transmissão no instante pré-falta



Fonte: Monteiro et al. (2018)

Aplicando-se técnicas de análises de circuito, é possível encontrar a expressão da Equação 38, onde a variável δ representa o ângulo de sincronização entre os terminais S e R. É possível ainda desmembrar a Equação 38 em suas partes reais e imaginárias, visto que essa expressão é de natureza complexa do formato $a + j.b$. A parte real e imaginária da Equação 38 são descritas respectivamente nas Equações 39 e 40, onde V_{S1} , I_{S1} , V_{R1} , I_{R1} são os módulos dos fasores dos terminais e $\theta_{V_{S1}}$, $\theta_{I_{S1}}$, $\theta_{V_{R1}}$ e $\theta_{I_{R1}}$ os respectivos ângulos de fase.

$$\overrightarrow{I_{S1}} + \overrightarrow{I_{R1}} \cdot e^{j\delta} = \frac{Y_{SR}}{2} (\overrightarrow{V_{S1}} + \overrightarrow{V_{R1}} \cdot e^{j\delta}) \quad (38)$$

$$I_{S1} \cos(\theta_{I_{S1}}) + I_{R1} \cos(\theta_{I_{R1}} + \delta) = -\frac{b_{shunt}}{2} [V_{S1} \sin(\theta_{V_{S1}}) + V_{R1} \sin(\theta_{V_{R1}} + \delta)] \quad (39)$$

$$I_{S1} \sin(\theta_{I_{S1}}) + I_{R1} \sin(\theta_{I_{R1}} + \delta) = \frac{b_{shunt}}{2} [V_{S1} \cos(\theta_{V_{S1}}) + V_{R1} \cos(\theta_{V_{R1}} + \delta)] \quad (40)$$

Com o intuito de auxiliar no entendimento e simplificar as Equações 39 e 40, são definidas variáveis a , b , c e d respectivamente nas Equações 41, 42, 43 e 44.

$$a = I_{S1} \cos(\theta_{I_{S1}}) \quad (41)$$

$$b = I_{S1} \sin(\theta_{I_{S1}}) \quad (42)$$

$$c = V_{S1} \sin(\theta_{V_{S1}}) \quad (43)$$

$$d = V_{S1} \cos(\theta_{V_{S1}}) \quad (44)$$

As Equações 45 e 46 mostram o rearranjo das Equações 39 e 40 em termos das variáveis a , b , c e d .

$$a + I_{R1} \cos(\theta_{I_{R1}} + \delta) = -\frac{b_{shunt}}{2} [c + V_{R1} \sin(\theta_{V_{R1}} + \delta)] \quad (45)$$

$$b + I_{R1} \sin(\theta_{I_{R1}} + \delta) = \frac{b_{shunt}}{2} [d + V_{R1} \cos(\theta_{V_{R1}} + \delta)] \quad (46)$$

Realizando-se a divisão das expressões das Equações 45 e 46 e isolando as expressões em termos apenas do ângulo de sincronização (δ), pode-se obter a Equação 47.

$$A = (x_1 + x_2 + x_3 + x_4) \cdot \cos(\delta) - (-y_1 + y_2 - y_3 + y_4) \cdot \sin(\delta) \quad (47)$$

Onde os parâmetros A , x_1 , x_2 , x_3 e x_4 são representados, na devida ordem, pelas Equações 48, 49, 50, 51 e 52 e os parâmetros y_1 , y_2 , y_3 e y_4 podem ser caracterizados, respectivamente, através das Equações 53, 54, 55 e 56.

$$A = a \cdot d + b \cdot c + V_{R1} \cdot I_{R1} \cdot \cos(\theta_{V_{R1}} - \theta_{I_{R1}}) \quad (48)$$

$$x_1 = -a \cdot V_{R1} \cos(\theta_{V_{R1}}) \quad (49)$$

$$x_2 = -b \cdot V_{R1} \sin(\theta_{V_{R1}}) \quad (50)$$

$$x_3 = -d \cdot I_{R1} \cos(\theta_{I_{R1}}) \quad (51)$$

$$x_4 = -c \cdot I_{R1} \sin(\theta_{I_{R1}}) \quad (52)$$

$$y_1 = a \cdot V_{R1} \sin(\theta_{V_{R1}}) \quad (53)$$

$$y_2 = b \cdot V_{R1} \cos(\theta_{V_{R1}}) \quad (54)$$

$$y_3 = d \cdot I_{R1} \sin(\theta_{I_{R1}}) \quad (55)$$

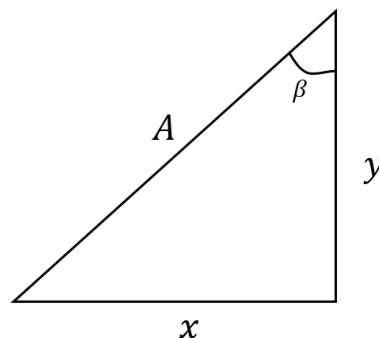
$$y_4 = c \cdot I_{R1} \cos(\theta_{I_{R1}}) \quad (56)$$

Reunindo as parcelas com a intenção de se construir uma expressão simplificada da Equação 47, pode-se agrupar as incógnitas através de $x = x_1 + x_2 + x_3 + x_4$ e $y = -y_1 + y_2 - y_3 + y_4$ e se obter a Equação 57.

$$A = x \cdot \cos(\delta) - y \cdot \sin(\delta) \quad (57)$$

A Equação 57 traz uma interpretação geométrica mostrada no triângulo retângulo da Figura 14, onde é possível retirar as relações trigonométricas apresentadas nas Equações 58, 59, 60 e 61.

Figura 14 - Interpretação geométrica entre x e y



Fonte: Autoria Própria (2020)

$$x = A \sin(\beta) \quad (58)$$

$$y = A \cos(\beta) \quad (59)$$

$$A = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (60)$$

$$\beta = \sin^{-1} \left(\frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}} \right) \quad (61)$$

Substituindo as identidades descritas acima na expressão da Equação 57 e uso de manipulações trigonométricas, pode-se encontrar a expressão mostrada na Equação 62.

$$\frac{A}{\sqrt{x^2 + y^2}} = \sin(\beta - \delta) \quad (62)$$

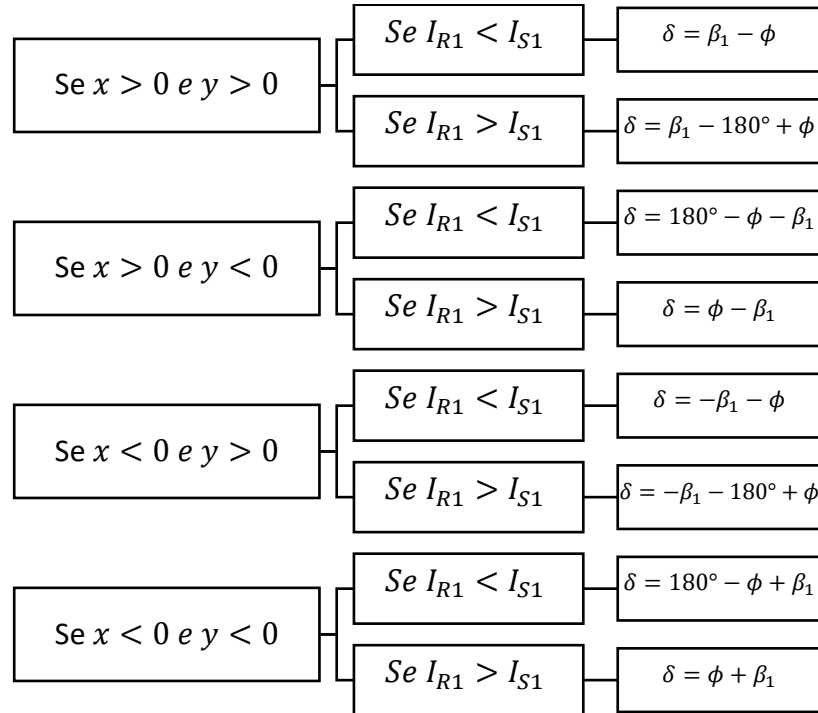
Isolando a incógnita que representa o ângulo de sincronização (δ), pode-se determinar sua expressão em termos dos fasores de tensões e correntes pré-falta do sistema, como mostra a Equação 63.

$$\delta = \sin^{-1} \left(\frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}} \right) - \phi \quad (63)$$

Onde: $\phi = \sin^{-1} \left(\frac{A}{\sqrt{x^2 + y^2}} \right)$

Cruz et al. (2016, p.3) apresenta uma lógica para determinar o ângulo β no quadrante correto, porém apresenta ângulos de sincronizações incorretos em algumas situações (MONTEIRO et al. , 2018 p.3). Dessa forma, Monteiro et al. (2018, p.4) apresenta um novo algoritmo para determinação do ângulo com as correções necessárias, onde a lógica é mostrada na Figura 15.

Figura 15 - Lógica do algoritmo de sincronização de Monteiro et al. (2018)



Fonte: Autoria Própria (2020)

O valor de β_1 , definido por Monteiro et al. (2018, p.3) é dado pela expressão apresentada na Equação 64.

$$\beta_1 = \text{sen}^{-1} \left(\frac{|x|}{\sqrt{x^2 + y^2}} \right) \quad (64)$$

3.3. ALGORITMO DE IDENTIFICAÇÃO DO INÍCIO DA FALTA

Identificar a amostra que representa o início de uma falta elétrica é de relevante importância para localização dessas faltas nas linhas de transmissão. Os principais métodos utilizam da Transformada Wavelet Discreta (TWD) ou fazem uso de métodos de comparação de valores instantâneos de dois ciclos do sinal (CRUZ,2015 p.87).

O algoritmo de identificação escolhido para este trabalho foi o método de comparação de ciclos, onde se fez uso dos sinais de corrente elétrica dos terminais para determinar o início da falta. A escolha dos sinais de corrente elétrica se faz pertinente devido as variações abruptas dos seus valores durante faltas elétricas.

3.3.1. Método de comparação de ciclos para localização do início de uma falta elétrica

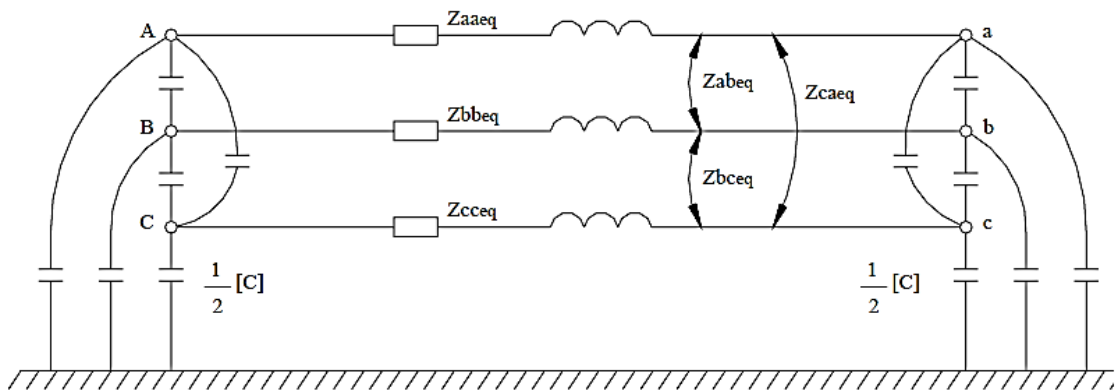
O método apresentado realiza a comparação entre duas amostras coincidentes de dois ciclos consecutivos de um mesmo sinal trifásico, de forma a averiguar se a diferença entre elas se encontra em uma margem de tolerância. Dessa forma, caso ocorra uma mudança considerada relevante (maior ou igual a 0,06 p.u) entre as amostras analisadas, o início da falta será determinado (CRUZ,2015 p.90).

Para certificar que a falta ocorreu, faz-se uma comparação de 4 amostras consecutivas de maneira a garantir que em todas elas a tolerância foi ultrapassada, sendo esse método aplicado em ambos os terminais da linha de transmissão.

3.4. MATRIZ DE IMPEDÂNCIA E ADMITÂNCIA EM UMA LINHA DE TRANSMISSÃO TRIFÁSICA

Em uma linha de transmissão, torna-se necessário definir os seus parâmetros elétricos trifásicos para modelar o seu comportamento. Seja uma linha trifásica em um modelo π , como mostrado na Figura 16, tem-se que a construção da matriz trifásica de impedância $[Z]$ e admitância $[Y]$ por unidade de comprimento podem ser expostas de acordo com as Equações 65 e 66.

Figura 16 - Representação trifásica de uma LT em um modelo π



Fonte: Silveira (2007)

$$[Z] = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \quad (65)$$

$$[Y] = \begin{bmatrix} Y_{aa} & Y_{ab} & Y_{ac} \\ Y_{ba} & Y_{bb} & Y_{bc} \\ Y_{ca} & Y_{cb} & Y_{cc} \end{bmatrix} \quad (66)$$

Caso a linha de transmissão não seja transposta, considerando a influência do solo e a geometria da linha, as Equações 65 e 66 assumem modificações em sua estrutura. Por outro lado, ao considerar a linha transposta em sua totalidade, obtém-se uma simplificação das expressões $[Z]$ e $[Y]$, que obedecem ao que é apresentado nas Equações 67 e 68 (SILVEIRA, 2007 p.34).

$$[Z] = \begin{bmatrix} Z_p & Z_m & Z_m \\ Z_m & Z_p & Z_m \\ Z_m & Z_m & Z_p \end{bmatrix} \quad (67)$$

$$[Y] = \begin{bmatrix} Y_p & Y_m & Y_m \\ Y_m & Y_p & Y_m \\ Y_m & Y_m & Y_p \end{bmatrix} \quad (68)$$

Onde: Z_p – impedância própria da linha de transmissão

Z_m – impedância mútua da linha de transmissão

Y_p – admitância própria da linha de transmissão

Y_m – admitância mútua da linha de transmissão

De acordo com Dommel (1995) apud Cruz (2010, p.41), os parâmetros de impedância mútua (Z_m), impedância própria (Z_p), admitância mútua (Y_m) e admitância própria (Y_p) podem ser expressos, na ordem, através das Equações 69, 70, 71, 72.

$$Z_m = \frac{(R_0 + j. \omega. L_0) - (R_1 + j. \omega. L_1)}{3} \quad (69)$$

$$Z_p = Z_m + (R_1 + j. \omega. L_1) \quad (70)$$

$$Y_m = \frac{(G_0 + j. \omega. C_0) - (G_1 + j. \omega. C_1)}{3} \quad (71)$$

$$Y_p = Y_m + (G_1 + j. \omega. C_1) \quad (72)$$

Onde: R_0 – resistência de sequência zero por unidade de comprimento

R_1 – resistência de sequência positiva por unidade de comprimento

L_0 – indutância de sequência zero por unidade de comprimento

L_1 – indutância de sequência positiva por unidade de comprimento

G_0 – condutância de sequência zero por unidade de comprimento

G_1 – condutância de sequência positiva por unidade de comprimento

C_0 – capacitância de sequência zero por unidade de comprimento

C_1 – capacitância de sequência positiva por unidade de comprimento

3.5. ÍNDICE DE DESEMPENHO PARA LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

Ao identificar um ponto de falta, fazendo uso de alguma técnica de localização, torna-se necessário mensurar a performance desses algoritmos com relação a sua precisão. O erro de localização de falta ε é dado pela diferença absoluta entre a distância estimada pelo algoritmo ($D_{estimado}$) e a distância real (D_{real}) com base no comprimento da linha de transmissão estudada onde ocorreu a falta (L). A Equação 73 apresenta a expressão que quantifica esse índice.

$$\varepsilon = \frac{|D_{estimado} - D_{real}| \cdot 100}{L} \quad (73)$$

Devido ao uso do janelamento como ferramenta para estimação fasorial, percebe-se que a cada janela de N de amostras, um novo fasor ($X \angle \theta$) é obtido. Para cada conjunto de novos fasores aplicado em um algoritmo de localização de faltas, uma novo ponto de falta D é estimado. Pode-se então afirmar que a localização de faltas depende, de forma indireta, do janelamento de dados e consequentemente por ciclos de amostras.

De acordo com Silveira (2007, p.93), “ nos casos reais de curto-circuito, é calculado também o erro médio obtido pelos algoritmos, para o total de casos analisados”. Pensando nisso, esse trabalho propôs calcular o erro médio para cada ciclo de N amostras ($\overline{\varepsilon_{ciclo}}$), como apresenta a Equação 74.

$$\overline{\varepsilon_{ciclo}} = \left[\sum_{k=1}^N \varepsilon(k) \right]_{ciclo} \cdot \frac{1}{N} \quad (74)$$

Não se deve confundir o janelamento de dados com os ciclos de análise, visto que nos ciclos não repetem amostras anteriores e representam o intervalo de tempo e amostras referentes a um período (T) da frequência fundamental do sinal. O objetivo de calcular o erro médio por ciclo ($\overline{\varepsilon_{ciclo}}$) é de comparar a precisão de cada técnica em virtude dos ciclos e além disso, realizar a comparação por ciclo de diferentes algoritmos de localização.

Em posse do erro médio por ciclo ($\overline{\varepsilon_{ciclo}}$), foi definido o menor e maior erro de localização contido em um determinado ciclo, conforme é apresentado nas Equações 75 e 76.

A intenção desses parâmetros é perceber se os valores máximos e mínimos de erros de localização destoam ou não do valor médio.

$$\varepsilon_{min} = menor(\varepsilon_{ciclo}) \quad (75)$$

$$\varepsilon_{max} = maior(\varepsilon_{ciclo}) \quad (76)$$

4. TÉCNICAS DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

A dissertação destina-se a estudar os algoritmos de localização de faltas que utilizem das componentes fundamentais dos fasores extraídos dos sinais de tensão e corrente elétrica do sistema. Essas técnicas de localização de faltas ainda podem ser classificadas em métodos que utilizem dados de um terminal de medição, ou algoritmos que empregam medições de múltiplos terminais.

A localização de uma falta utilizando apenas medições de um terminal podem apresentar erros de estimação, devido a modelagem incompleta do sistema elétrico realizada por esses algoritmos (RAYBOLT, 2011 p.13).

Alguns autores defendem a melhoria da precisão dos algoritmos de localização de faltas quando se faz uso de dados medidos em dois terminais da linha de transmissão, como afirma Gautier (1996, p.18). Dessa forma, torna-se conveniente o foco em algoritmos de localização baseados em medições em múltiplos terminais.

Técnicas aplicando múltiplos terminais apresentam a vantagem de, normalmente não depender das configurações das fontes do sistema e da impedância de falta ocasionada (GAUTIER, 1996 p.18). A dificuldade atrelada a esses métodos, por sua vez, é de um sistema de comunicação para captação dos dados de ambos os terminais da linha de transmissão e um sistema de sincronização desses sinais.

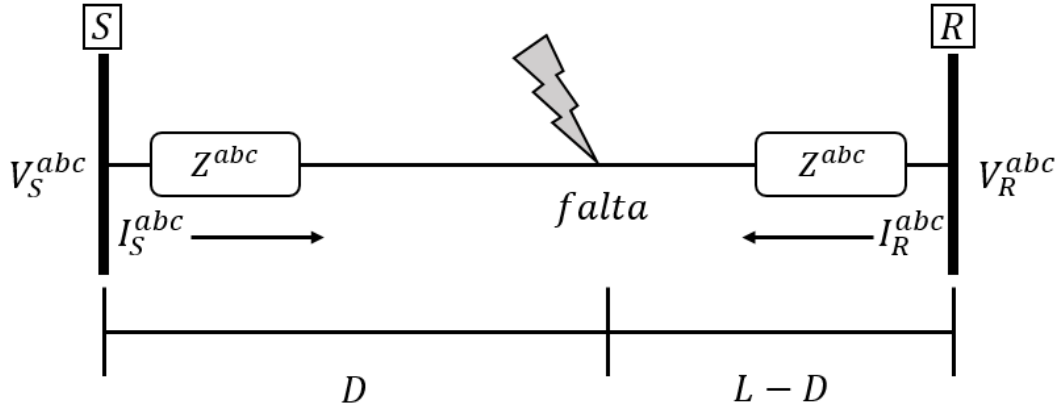
Esse capítulo traz a descrição matemática das técnicas de localização de faltas em linhas de transmissão que serão utilizadas na construção do simulador didático. Os algoritmos são baseados em técnicas de múltiplos terminais, especificamente focando em medições em dois e três terminais.

4.1.ALGORITMO PROPOSTO POR GIRGIS, HART E PETERSON UTILIZANDO DADOS DE DOIS TERMINAIS

A técnica proposta por Girgis, Hart e Peterson (1992) utiliza-se de dados sincronizados de dois terminais, sendo eles o terminal local (representado através da letra S) e o terminal remoto (simbolizado mediante a letra R).

Nesse método, a linha possui comprimento L e em uma determinada localização D do terminal local (S) ocorre uma falta elétrica. Os sinais trifásicos em cada terminal são definidos por V_S^{abc} , V_R^{abc} , I_S^{abc} e I_R^{abc} e apresentados na Figura 17 através de uma representação unifilar do sistema.

Figura 17 - Representação unifilar de uma LT com falta em um determinado ponto D



Fonte: Autoria Própria (2020)

É possível, aplicando técnicas de análise de circuitos definir as Equações 77 e 78 que relacionam as tensões e correntes de cada barramento em função da tensão de falta (V_F^{abc}).

$$V_S^{abc} = V_F^{abc} + D \cdot Z_{abc} \cdot I_S^{abc} \quad (77)$$

$$V_R^{abc} = V_F^{abc} + (L - D) \cdot Z_{abc} \cdot I_R^{abc} \quad (78)$$

Onde: Z_{abc} – matriz de impedância série por unidade de comprimento da linha

Realizando a subtração das Equações 77 e 78, com a intenção de eliminar a tensão de falta (V_F^{abc}) da análise e rearranjando a expressão, pode-se obter a Equação 79.

$$V_S^{abc} - V_R^{abc} + L \cdot Z_{abc} \cdot I_R^{abc} = D \cdot Z_{abc} \cdot (I_S^{abc} + I_R^{abc}) \quad (79)$$

A Equação 79 pode ser reescrita, em termos trifásicos, através da Equação 80.

$$\begin{bmatrix} Y_a \\ Y_b \\ Y_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_a \\ M_b \\ M_c \end{bmatrix} \cdot D \quad (80)$$

Onde: $Y_j = V_S^j - V_R^j + L \cdot \sum_{i=a,b,c} (Z_{ji} \cdot I_R^i)$

$$M_j = \sum_{i=a,b,c} Z_{ji} \cdot (I_S^i + I_R^i)$$

$$j = a, b, c$$

De acordo com Girgis, Hart e Peterson (1992, p.99), o desenvolvimento da Equação 80 promove 3 expressões complexas, que significam 6 equações reais e apenas uma incógnita (D). A solução da expressão pode ser obtida utilizando o método dos mínimos quadrados, como é apresentada na Equação 81.

$$D = (M^+.M)^{-1}.M^+.Y \quad (81)$$

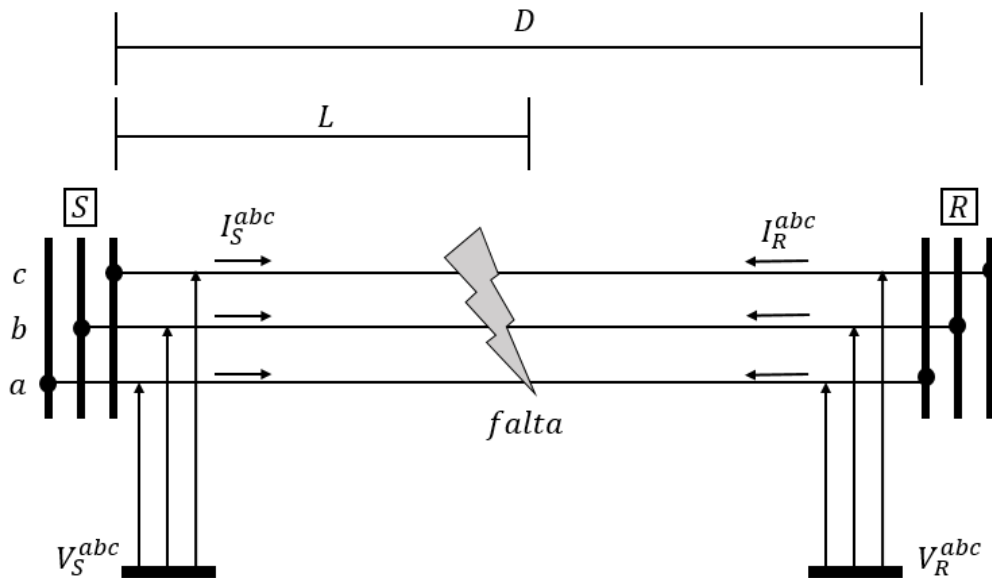
Onde: M^+ é a matriz conjugada transposta da matriz M

O procedimento realizado por essa técnica independe do tipo de falta, não solicita informações de impedância da fonte e considera a linha de transmissão não transposta. Por outro lado, nesse algoritmo não é considerado o ramo de admitância *shunt* da linha de transmissão, que pode introduzir erros e sendo mais indicado para aplicação em linhas curtas (SILVEIRA,2007 p.51).

4.2. ALGORITMO PROPOSTO POR PRESTON ET AL. UTILIZANDO DADOS DE DOIS TERMINAIS

Preston et al. (2011) propôs outra técnica para localizar faltas em linhas de transmissão, onde adota-se as tensões e correntes trifásicas sincronizadas em cada terminal S e R como V_S^{abc} , V_R^{abc} , I_S^{abc} e I_R^{abc} . A linha de transmissão possui comprimento D e em um determinado momento, uma falta elétrica ocorre a uma distância L do terminal local (S), como mostra em uma representação trifásica a Figura 18.

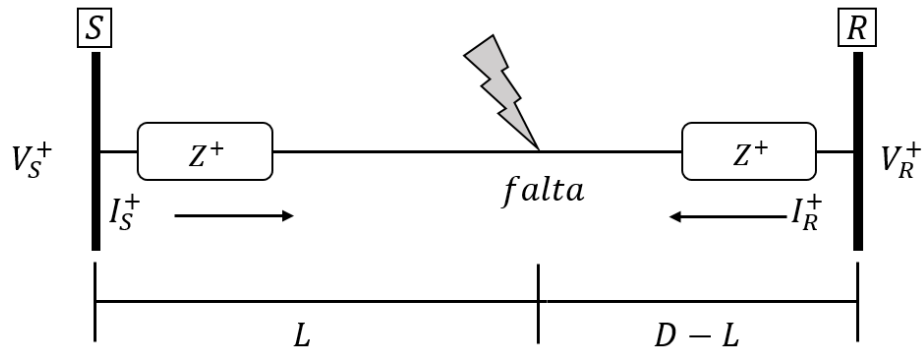
Figura 18 - Representação trifásica de uma falta elétrica em uma LT



Fonte: Autoria Própria (2020)

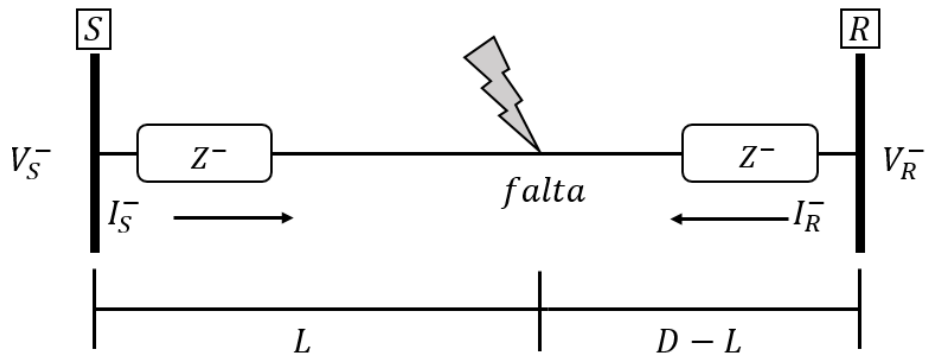
O sistema no domínio das fases (abc) representado na Figura 18 pode ser reescrito no domínio das sequências zero, positiva e negativa ($0 + -$). Nesta técnica solicita-se apenas os circuitos de sequência positiva e negativa dos fasores medidos em cada terminal S e R . Os circuitos equivalentes de sequência positiva e negativa podem ser observados, na ordem, através das Figuras 19 e 20.

Figura 19 - Circuito de sequência positiva durante uma falta



Fonte: Autoria Própria (2020)

Figura 20 - Circuito de sequência negativa durante uma falta



Fonte: Autoria Própria (2020)

Solucionando as expressões pertinentes para cada terminal em função da tensão de falta e eliminando esse termo através de substituição, pode-se encontrar as Equações 82 e 83 para os circuitos de sequência positiva e negativa, respectivamente.

$$V_S^+ - z^+ \cdot L \cdot I_S^+ = V_R^+ - z^+ \cdot (D - L) \cdot I_R^+ \quad (82)$$

$$V_S^- - z^- \cdot L \cdot I_S^- = V_R^- - z^- \cdot (D - L) \cdot I_R^- \quad (83)$$

Onde: z^+ - impedância série de sequência positiva por unidade de comprimento

z^- - impedância série de sequência negativa por unidade de comprimento

Preston et al. (2011 p.377) apresenta sua técnica independente das características da linha de transmissão, e assim utiliza-se das Equações 82 e 83 para isolar os termos z^+ e z^- , que foram substituídos pela incógnita z que são apresentadas nas Equações 84 e 85.

$$z \cdot L = \frac{(V_S^+ - V_R^+) \cdot I_R^- - (V_S^- - V_R^-) \cdot I_R^+}{I_S^+ \cdot I_R^- - I_S^- \cdot I_R^+} \quad (84)$$

$$z \cdot (D - L) = \frac{(V_S^+ - V_R^+) \cdot I_S^- - (V_S^- - V_R^-) \cdot I_S^+}{I_S^+ \cdot I_R^- - I_S^- \cdot I_R^+} \quad (85)$$

Como proposto por Preston et al. (2011, p.378), a distância do ponto de falta (L) é uma porcentagem do valor total do comprimento da linha de transmissão (D), como apresenta a Equação 86. Rearranjando os termos, a expressão anterior pode ser reescrita em função da impedância série da linha, como mostra a Equação 87.

$$L\% = \frac{L}{D} \cdot 100 \quad (86)$$

$$L\% = \frac{z \cdot L}{z \cdot L + z(D - L)} \cdot 100 \quad (87)$$

Substituindo o que foi desenvolvido pelas Equações 84 e 85 junto a Equação 87, obtém-se a porcentagem do valor total do ponto de falta ($L\%$) em função dos fasores de sequência positiva e negativa de cada terminal S e R . A Equação 88 expressa essa relação e determina o ponto de falta de forma percentual.

$$L\% = \frac{(V_S^+ - V_R^+) \cdot I_R^- - (V_S^- - V_R^-) \cdot I_R^+}{(V_S^+ - V_R^+) \cdot (I_S^- + I_R^-) - (V_S^- - V_R^-) \cdot (I_S^+ + I_R^+)} \cdot 100 \quad (88)$$

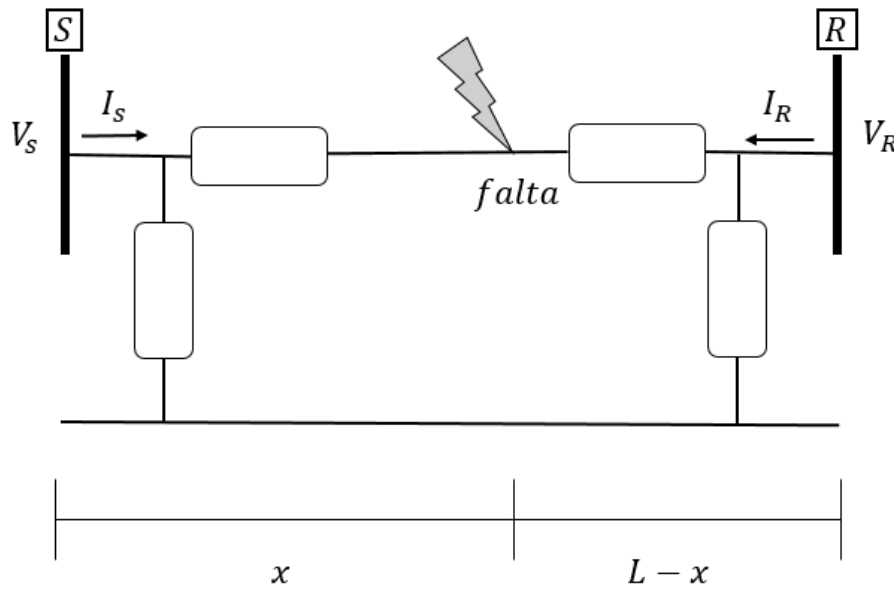
As vantagens desta técnica estão em não necessitar dos parâmetros da linha de transmissão, não ser sensível ao valor da resistência de falta, não demandar de procedimentos rigorosos de localização e poder ser utilizado em faltas simétricas e assimétricas. As dificuldades encontradas são elencadas em possuir uma localização mais precisa em linhas de transmissão curtas (visto que a admitância *shunt* foi negligenciada no algoritmo) e a necessidade de dados sincronizados de ambos os terminais da linha (PRESTON ET AL. 2011, p.377-278)

4.3.ALGORITMO PROPOSTO POR JOHNS E JAMALI UTILIZANDO DADOS DE DOIS TERMINAIS

O método de Johns e Jamali (1990) utiliza os fasores fundamentais de tensões e correntes observados dos terminais local (S) e remoto (R), e representa a linha de transmissão de modo mais fiel através do modelo de parâmetros distribuídos.

Dessa forma, considere a Figura 21, que apresenta uma linha de transmissão monofásica (de comprimento L) modelada em parâmetros distribuídos em um circuito π -equivalente, onde ocorre uma falta elétrica a uma distância x do terminal local (S).

Figura 21 - Falta elétrica em uma LT monofásica com parâmetros distribuídos em circuito π -equivalente



Fonte: Autoria Própria (2020)

É possível, aplicando técnicas de análise de circuitos, definir as Equações 89 e 90 que relacionam as tensões e correntes de cada barramento (S) e (R) em função da tensão no ponto de falta (V_F).

$$V_F = \cosh(\gamma \cdot x) \cdot V_S - Z_0 \cdot \sinh(\gamma \cdot x) \cdot I_S \quad (89)$$

$$V_F = \cosh(\gamma \cdot (L - x)) \cdot V_R - Z_0 \cdot \sinh(\gamma \cdot (L - x)) \cdot I_R \quad (90)$$

Onde: γ – constante de propagação da linha de transmissão

Z_0 – impedância característica da linha de transmissão

A constante de propagação (γ) e a impedância característica (Z_0) podem ser encontradas conhecendo os parâmetros elétricos da linha por unidade de comprimento, sendo estes a resistência (R), a indutância (L), a condutância (G) e a capacitância (C). A relação entre estes para definir a constante de propagação e a impedância característica são expostas nas Equações 91 e 92, de modo que Z é considerada a impedância série e Y a admitância *shunt* da linha.

$$\gamma = \sqrt{(R + j \cdot \omega \cdot L) \cdot (G + j \cdot \omega \cdot C)} = \sqrt{Z \cdot Y} \quad (91)$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{(R + j \cdot \omega \cdot L)}{(G + j \cdot \omega \cdot C)}} = \sqrt{\frac{Z}{Y}} \quad (92)$$

Igualando as expressões contidas nas Equações 89 e 90, com a intenção de eliminar a tensão do ponto de falta (V_F), e reorganizando matematicamente de forma a isolar o local de falta x , obtém-se a Equação 93 (JOHNS; JAMALI, 1990 p.396).

$$x = \frac{\tanh^{-1}\left(\frac{-B}{A}\right)}{\gamma} \quad (93)$$

As Equações 94 e 95 apresentam, na ordem, como interpretar os parâmetros A e B para identificação da falta.

$$A = Z_0 \cdot \cosh(\gamma \cdot L) \cdot I_R - \sinh(\gamma \cdot L) \cdot V_R + Z_0 \cdot I_S \quad (94)$$

$$B = \cosh(\gamma \cdot L) \cdot V_R - Z_0 \cdot \sinh(\gamma \cdot L) \cdot I_R - V_S \quad (95)$$

O método apresentado de maneira monofásica não pode ser aplicado em uma linha de transmissão trifásica, porém auxilia no entendimento. Na interpretação trifásica, as expressões vistas nas Equações 89 e 90 podem ser reescritas da forma mostrada nas Equações 96 e 97.

$$[V_F^{abc}] = [A_S] \cdot [V_S^{abc}] - [B_S] \cdot [I_S^{abc}] \quad (96)$$

$$[V_F^{abc}] = [A_R] \cdot [V_R^{abc}] - [B_R] \cdot [I_R^{abc}] \quad (97)$$

Com o objetivo de transformar uma análise trifásica, mostrada nas Equações 96 e 97, em três análises monofásicas desacopladas, foi utilizado a teoria dos modos naturais (JOHNS; JAMALI, 1990 p.396).

O método consiste em encontrar a matriz dos autovetores provenientes do produtos das matrizes trifásicas da impedância série e da admitância *shunt* $[Z][Y]$ e $[Y][Z]$, que serão nomeados respectivamente por $[Q]$ e $[S]$. As tensões e correntes de qualquer terminal em funções dos modos ($m = 1, 2 \text{ e } 3$) podem ser encontradas através das Equações 98 e 99, na ordem.

$$[V^{123}] = [Q]^{-1} \cdot [V^{abc}] \quad (98)$$

$$[I^{123}] = [S]^{-1} \cdot [I^{abc}] \quad (99)$$

Em posse dos fasores dos terminais local e remoto em função dos modos, a análise se resume em realizar uma solução monofásica para cada modo ($m = 1, 2 \text{ ou } 3$). Assim, as

Equações 93, 94 e 95 que são primordiais para determinação do ponto de falta, podem ser reescritas em termos de componentes modais como apresentado nas Equações 100, 101 e 102.

$$x^m = \frac{\tanh^{-1}\left(\frac{-B^m}{A^m}\right)}{\gamma^m} \quad (100)$$

$$A^m = Z_0^m \cdot \cosh(\gamma^m \cdot L) \cdot I_R^m - \sinh(\gamma^m \cdot L) \cdot V_R^m + Z_0^m \cdot I_S^m \quad (101)$$

$$B^m = \cosh(\gamma^m \cdot L) \cdot V_R^m - Z_0^m \cdot \sinh(\gamma^m \cdot L) \cdot I_R^m - V_S^m \quad (102)$$

A constante de propagação modal (γ^m) é definida através da raiz quadrada dos autovalores obtidos do produto $[Z][Y]$ e a impedância característica modal (Z_0^m) pode ser definida através da Equação 103 (JOHNS; JAMALI, 1990 p.397).

$$[Z_0^m] = [\gamma^m]^{-1} \cdot [Q]^{-1} \cdot [Z] \cdot [S] \quad (103)$$

4.3.1. Considerações Práticas do Algoritmo de Jonhs e Jamali (1990)

A impedância série $[Z]$ e a admitância *shunt* $[Y]$ da linha de transmissão dependem do conhecimento da geometria do condutor, de seus parâmetros elétricos e da resistividade do plano de terra (JOHNS; JAMALI, 1990 p.397).

Johns e Jamali (1990, p.397) afirmam que, na maioria das aplicações considerando uma linha perfeitamente transposta, introduzem erros inferiores a 1% que são aceitáveis em condições práticas de localização.

Considerando uma linha perfeitamente simétrica e a moda $m = 2$, a impedância característica ($Z_0^{m=2}$) e a constante de propagação ($\gamma^{m=2}$) podem ser definidas, em ordem, por meio das Equações 104 e 105.

$$Z_0^{m=2} = \sqrt{\frac{Z_1}{Y_1}} \quad (104)$$

$$\gamma^{m=2} = \sqrt{Z_1 \cdot Y_1} \quad (105)$$

Onde : Z_1 – impedância série de sequência positiva da linha de transmissão

Y_1 – admitância *shunt* de sequência positiva da linha de transmissão

Além disso, a transposição perfeita da linha de transmissão implica em matrizes de autovetores $[S]$ e $[Q]$ iguais e definidas como mostra a Equação 106.

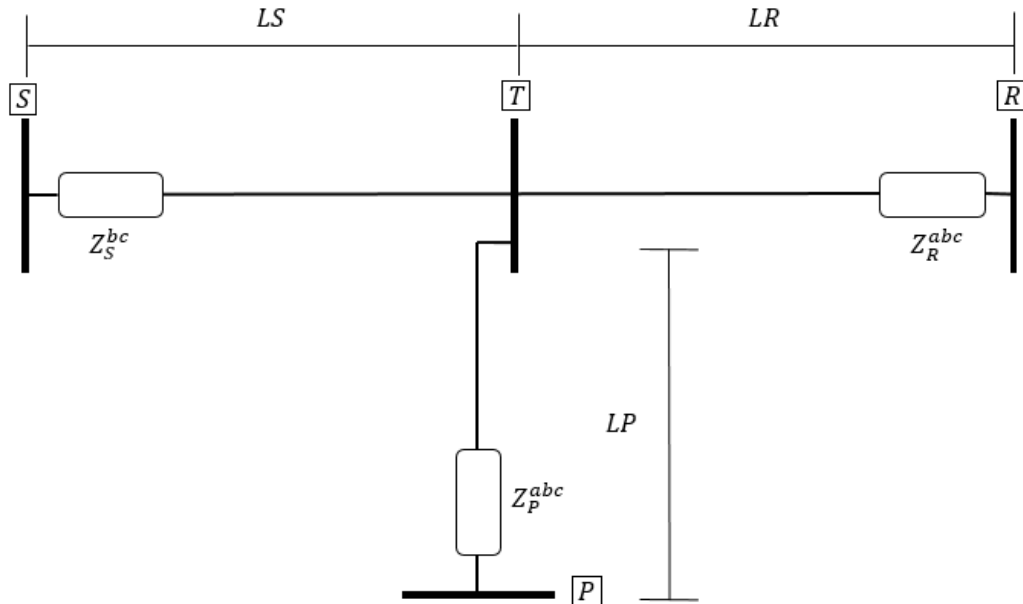
$$[S] = [Q] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & -2 \\ 1 & -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (106)$$

4.4. ALGORITMO DE GIRGIS, HART E PETERSON UTILIZANDO DADOS DE TRÊS TERMINAIS

Girgis, Hart e Peterson (1992) propuseram um método de localização de faltas utilizando dados sincronizados de tensão e corrente elétrica de três terminais (sendo eles os terminais S , R e P). Cada trecho de linha de transmissão (LS , LR e LP) são definidos e em quaisquer deles, pode ocorrer uma falta elétrica.

Além disso, por se tratar de trechos diferentes, cada um possui sua matriz de impedância série trifásica que dependem de seus parâmetros elétricos e representadas respectivamente por Z_S^{abc} , Z_R^{abc} e Z_P^{abc} . As medições de tensões e correntes elétricas em cada terminal são apresentadas através das expressões V_S^{abc} , V_R^{abc} , V_P^{abc} , I_S^{abc} , I_R^{abc} e I_P^{abc} . A Figura 22 apresenta o diagrama unifilar do sistema analisado.

Figura 22 - Sistema com três terminais de medição



Fonte: Autoria Própria (2020)

$$M_j = \sum_{k=a,b,c} Z_S^{jk} \cdot (I_S^k + I_R^k + I_P^k). \quad j = a, b, c \text{ e } k = a, b, c$$

A solução da expressão pode ser obtida utilizando o método dos mínimos quadrados, como é apresentada na Equação 112.

$$D = (M^+ \cdot M)^{-1} \cdot M^+ \cdot Y1 \quad (112)$$

Onde: M^+ é a matriz conjugada transposta da matriz M

Seguindo a linha de raciocínio, iguala-se as Equações 107 e 109 para eliminar o valor desconhecido da tensão no ponto de falta (V_F^{abc}), como mostra a Equação 113.

$$V_S^{abc} - V_P^{abc} + (LS \cdot Z_S^{abc} + LP \cdot Z_P^{abc}) \cdot I_P^{abc} + Z_S^{abc} \cdot LS \cdot I_S^{abc} = D \cdot Z_S^{abc} (I_S^{abc} + I_R^{abc} + I_P^{abc}) \quad (113)$$

A Equação 113 pode ser reescrita, em termos trifásicos, através da expressão contida na Equação 114.

$$\begin{bmatrix} Y2_a \\ Y2_b \\ Y2_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_a \\ M_b \\ M_c \end{bmatrix} \cdot D' \quad (114)$$

$$\text{Onde: } Y2_j = V_S^j - V_P^j + \sum_{k=a,b,c} (LS \cdot Z_S^{jk} + LP \cdot Z_P^{jk}) \cdot I_P^k + LS \cdot \sum_{k=a,b,c} (Z_S^{jk} \cdot I_S^k)$$

$$M_j = \sum_{k=a,b,c} Z_S^{jk} \cdot (I_S^k + I_R^k + I_P^k). \quad j = a, b, c \text{ e } k = a, b, c$$

O método dos mínimos quadrados pode ser novamente aplicado, para se determinar o valor da localização de falta D' como é apresentada na Equação 115.

$$D' = (M^+ \cdot M)^{-1} \cdot M^+ \cdot Y2 \quad (115)$$

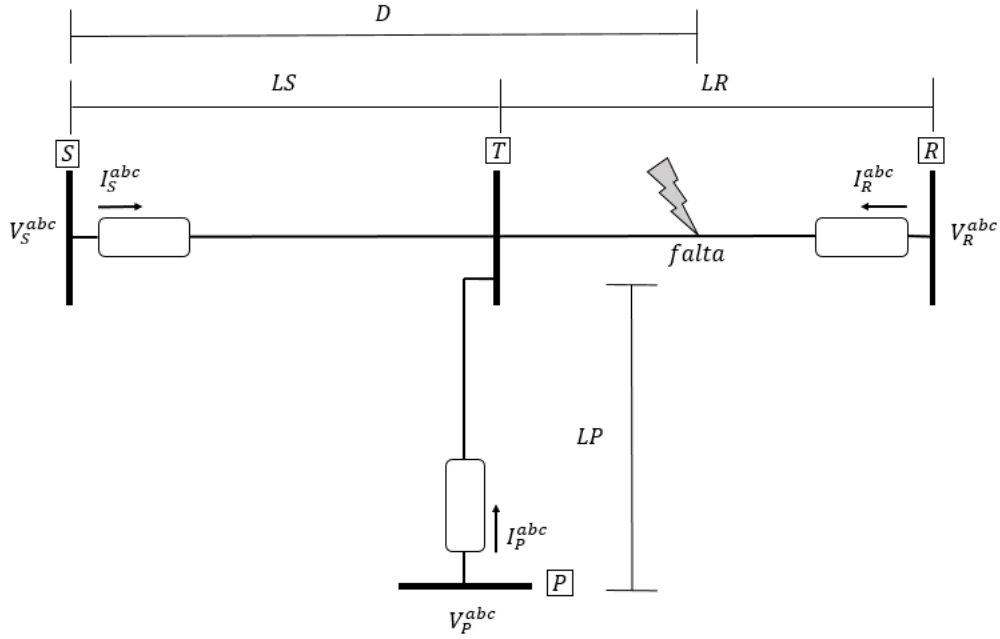
Onde: M^+ é a matriz conjugada transposta da matriz M

Segundo Girgis, Hart e Peterson (1992, p.101), se a falta ocorreu verdadeiramente no trecho, tem-se que $D < LS$ e $D' < LS$.

4.4.2. Falta elétrica em LR

Caso ocorra uma falta no trecho que compreende LR , como se mostra na Figura 24, é possível encontrar 3 expressões que relacionem os fasores de cada terminal com a tensão no ponto de falta (V_F^{abc}), como mostra as Equações 116, 117 e 118.

Figura 24 - Falta elétrica ocorrida no trecho LR



Fonte: Autoria Própria (2020)

$$V_F^{abc} = V_S^{abc} - LS \cdot Z_S^{abc} \cdot I_S^{abc} - (D - LS) \cdot Z_R^{abc} \cdot (I_S^{abc} + I_P^{abc}) \quad (116)$$

$$V_F^{abc} = V_R^{abc} - (LS + LR - D) \cdot Z_R^{abc} \cdot I_R^{abc} \quad (117)$$

$$V_F^{abc} = V_P^{abc} - LP \cdot Z_P^{abc} \cdot I_P^{abc} - (D - LS) \cdot Z_R^{abc} \cdot (I_S^{abc} + I_P^{abc}) \quad (118)$$

Com intuito de eliminar a tensão de falta (V_F^{abc}) que é desconhecida, iguala-se as Equações 116 e 117, apresentando a Equação 119.

$$\begin{aligned} V_S^{abc} - V_R^{abc} + (-LS \cdot Z_S^{abc} + LS \cdot Z_R^{abc}) \cdot I_S^{abc} + (LS + LR) \cdot Z_R^{abc} \cdot I_R^{abc} \\ + LS \cdot Z_R^{abc} \cdot I_P^{abc} = D \cdot Z_R^{abc} (I_S^{abc} + I_R^{abc} + I_P^{abc}) \end{aligned} \quad (119)$$

A Equação 119 pode ser reescrita, em termos trifásicos, através da expressão contida na Equação 120.

$$\begin{bmatrix} Y3_a \\ Y3_b \\ Y3_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M2_a \\ M2_b \\ M2_c \end{bmatrix} \cdot D \quad (120)$$

$$\text{Onde: } Y3_j = V_S^j - V_R^j + \sum_{k=a,b,c} (-LS \cdot Z_S^{jk} + LS \cdot Z_R^{jk}) \cdot I_S^k + \dots$$

$$\dots + (LS + LR) \cdot \sum_{k=a,b,c} (Z_R^{jk}) \cdot I_R^k + LS \cdot \sum_{k=a,b,c} (Z_R^{jk} \cdot I_P^k)$$

$$M2_j = \sum_{k=a,b,c} Z_R^{jk} \cdot (I_S^k + I_R^k + I_P^k). \quad j = a, b, c \text{ e } k = a, b, c$$

A solução da expressão pode ser obtida utilizando o método dos mínimos quadrados, como é apresentada na Equação 121.

$$D = (M2^+.M2)^{-1}.M2^+.Y3 \quad (121)$$

Onde: M^+ é a matriz conjugada transposta da matriz M

Seguindo a linha de raciocínio, iguala-se as Equações 117 e 118 para eliminar o valor desconhecido da tensão no ponto de falta (V_F^{abc}), como mostra a Equação 122.

$$\begin{aligned} V_P^{abc} - V_R^{abc} + (LS.Z_R^{abc}).I_S^{abc} + (LS + LR)Z_R^{abc}.I_R^{abc} \dots \\ \dots - (LP.Z_P^{abc} - LS.Z_R^{abc}).I_P^{abc} = D.Z_S^{abc}.(I_S^{abc} + I_R^{abc} + I_P^{abc}) \end{aligned} \quad (122)$$

A Equação 122 pode ser reescrita, em termos trifásicos, através da expressão contida na Equação 123.

$$\begin{bmatrix} Y4_a \\ Y4_b \\ Y4_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M2_a \\ M2_b \\ M2_c \end{bmatrix}.D' \quad (123)$$

$$\begin{aligned} \text{Onde: } Y4_j &= V_P^j - V_R^j + LS.\sum_{k=a,b,c}(Z_R^{jk}).I_S^k + (LS + LR).\sum_{k=a,b,c}(Z_R^{jk}).I_R^k \dots \\ &\dots - \sum_{k=a,b,c}(LP.Z_P^{jk} - LS.Z_R^{jk}).I_P^k \\ M2_j &= \sum_{k=a,b,c}Z_S^{jk}.(I_S^k + I_R^k + I_P^k). \quad j = a, b, c \text{ e } k = a, b, c \end{aligned}$$

O método dos mínimos quadrados pode ser novamente aplicado, para se determinar o valor da localização de falta D' como é apresentada na Equação 124.

$$D' = (M2^+.M2)^{-1}.M2^+.Y4 \quad (124)$$

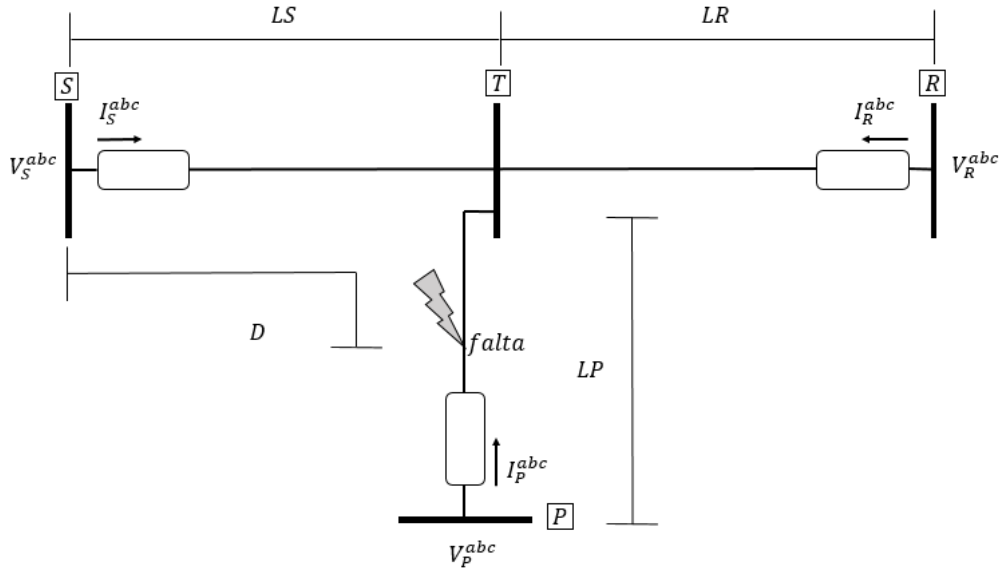
Onde: M^+ é a matriz conjugada transposta da matriz M

Segundo Girgis, Hart e Peterson (1992, p.101), se a falta ocorreu verdadeiramente no trecho, tem-se que $LS < D < (LS + LR)$ e $LS < D' < (LS + LR)$.

4.4.3. Falta elétrica em LP

Caso ocorra uma falta no trecho que compreende LP , como se mostra na Figura 25, é possível encontrar 3 expressões que relacionem os fasores de cada terminal com a tensão no ponto de falta (V_F^{abc}), como mostra as Equações 125, 126 e 127.

Figura 25 - Falta elétrica ocorrida no trecho LP



Fonte: Autoria Própria (2020)

$$V_F^{abc} = V_S^{abc} - LS \cdot Z_S^{abc} \cdot I_S^{abc} - (D - LS) \cdot Z_P^{abc} \cdot (I_S^{abc} + I_R^{abc}) \quad (125)$$

$$V_F^{abc} = V_R^{abc} - LR \cdot Z_R^{abc} \cdot I_R^{abc} - (D - LS) \cdot Z_P^{abc} \cdot (I_S^{abc} + I_R^{abc}) \quad (126)$$

$$V_F^{abc} = V_P^{abc} - (LS + LP - D) \cdot Z_P^{abc} \cdot I_P^{abc} \quad (127)$$

Com intuito de eliminar a tensão de falta (V_F^{abc}) que é desconhecida, iguala-se as Equações 125 e 127, apresentando a Equação 128.

$$\begin{aligned} V_S^{abc} - V_P^{abc} + (-LS \cdot Z_S^{abc} + LS \cdot Z_P^{abc}) \cdot I_S^{abc} + (LS) \cdot Z_P^{abc} \cdot I_R^{abc} + (LS + LP) \cdot Z_P^{abc} \cdot I_P^{abc} \\ = D \cdot Z_P^{abc} (I_S^{abc} + I_R^{abc} + I_P^{abc}) \end{aligned} \quad (128)$$

A Equação 128 pode ser reescrita, em termos trifásicos, através da expressão contida na Equação 129.

$$\begin{bmatrix} Y5_a \\ Y5_b \\ Y5_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M3_a \\ M3_b \\ M3_c \end{bmatrix} \cdot D \quad (129)$$

$$\text{Onde: } Y5_j = V_S^j - V_P^j + \sum_{k=a,b,c} (-LS \cdot Z_S^{jk} + LS \cdot Z_P^{jk}) \cdot I_S^k + \dots$$

$$\dots + (LS) \cdot \sum_{k=a,b,c} (Z_P^{jk}) \cdot I_R^k + (LS + LP) \cdot \sum_{k=a,b,c} (Z_P^{jk} \cdot I_P^k)$$

$$M3_j = \sum_{k=a,b,c} Z_P^{jk} \cdot (I_S^k + I_R^k + I_P^k). \quad j = a, b, c \text{ e } k = a, b, c$$

A solução da expressão pode ser obtida utilizando o método dos mínimos quadrados, como é apresentada na Equação 130.

$$D = (M3^+.M3)^{-1}.M3^+.Y5 \quad (130)$$

Onde: M^+ é a matriz conjugada transposta da matriz M

Seguindo a linha de raciocínio, iguala-se as Equações 126 e 127 para eliminar o valor desconhecido da tensão no ponto de falta (V_F^{abc}), como mostra a Equação 131.

$$\begin{aligned} V_R^{abc} - V_P^{abc} + LS.Z_P^{abc}.I_S^{abc} + (-LR.Z_R^{abc} + LS.Z_P^{abc}).I_R^{abc} + (LS + LP).Z_P^{abc}.I_P^{abc} \\ = D.Z_P^{abc}(I_S^{abc} + I_R^{abc} + I_P^{abc}) \end{aligned} \quad (131)$$

A Equação 131 pode ser reescrita, em termos trifásicos, através da expressão contida na Equação 132.

$$\begin{bmatrix} Y6_a \\ Y6_b \\ Y6_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M3_a \\ M3_b \\ M3_c \end{bmatrix}.D' \quad (132)$$

$$\text{Onde: } Y6_j = V_R^j - V_P^j + (LS).\sum_{k=a,b,c}(Z_P^{jk}).I_S^k + \sum_{k=a,b,c}(-LR.Z_R^{jk} + LS.Z_P^{jk}).I_R^k + (LS + LP).\sum_{k=a,b,c}(Z_P^{jk}.I_P^k)$$

$$M3_j = \sum_{k=a,b,c} Z_P^{jk} \cdot (I_S^k + I_R^k + I_P^k). \quad j = a, b, c \text{ e } k = a, b, c$$

O método dos mínimos quadrados pode ser novamente aplicado, para se determinar o valor da localização de falta D' como é apresentada na Equação 133.

$$D' = (M3^+.M3)^{-1}.M3^+.Y6 \quad (133)$$

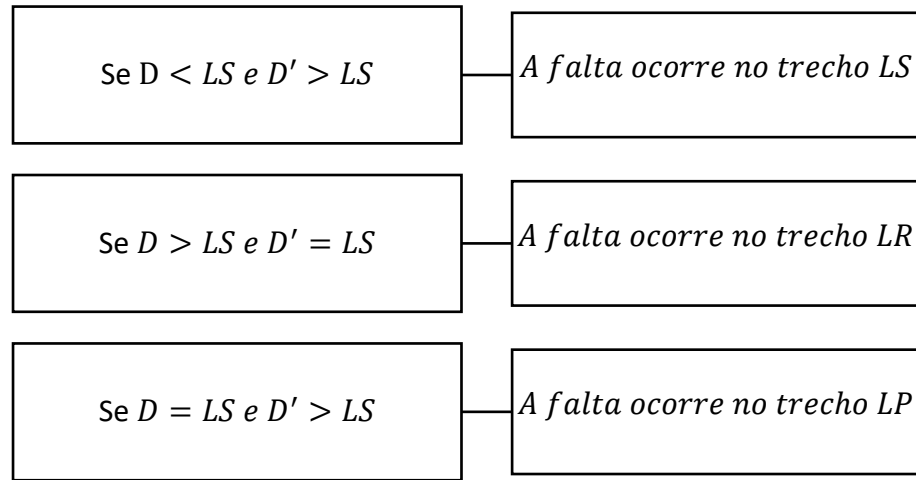
Onde: M^+ é a matriz conjugada transposta da matriz M

Segundo Girgis, Hart e Peterson (1992, p.101), se a falta ocorreu verdadeiramente no trecho, tem-se que $LS < D < (LS + LP)$ e $LS < D' < (LS + LP)$.

4.4.4. Simplificação proposta por Girgis, Hart e Peterson (1992)

Caso as linhas de transmissão possuam parâmetros elétricos idênticos e consequentemente apresentem a mesma matriz de impedância trifásica (Z^{abc}), torna-se necessário conhecer apenas as soluções provenientes para localização de uma falta elétrica no trecho LS . (GIRGIS; HART; PETERSON, 1992 p.101). As simplificações consideradas levam as soluções mostradas na Figura 26.

Figura 26 - Simplificação proposta por Girgis, Hart e Peterson (1992)



Fonte: Autoria Própria (2020)

5. SIMULADOR DIDÁTICO PROPOSTO

Neste capítulo são descritas as etapas a serem seguidas no desenvolvimento da pesquisa e do simulador, suas principais diretrizes, o entendimento básico sobre os algoritmos implementados e as particularidades que caracterizam a interface gráfica criada.

O Simulador Didático de Estimação Fasorial e Localização de Faltas em Linhas de Transmissão Trifásicas (SELF3Ø) é a interface gráfica arquitetada como produção principal dessa dissertação.

5.1. SOBRE A CRIAÇÃO DA INTERFACE GRÁFICA

O SELF3Ø foi construído utilizando um programa de interface gráfica que permite ao usuário realizar atividades interativas, sem a necessidade de entender os detalhes das ações que são executadas.

Um exemplo básico de interface gráfica é a calculadora virtual, onde se torna possível obter diversos resultados aritméticos sem a real necessidade de realizar operações (apenas com poucos cliques). De maneira geral, uma interface gráfica espera receber “orientações” do usuário e com base nisso, responde (através da função de retorno de chamada) a própria interface por meio da programação orientada à eventos.

Os eventos podem ser definidos como ações de componentes que foram introduzidos junto a interface, como botões e sinalizadores. Na programação orientada à eventos, as funções de retorno de chamada são assíncronas e dependem dos eventos a elas agrupadas.

Com uma interface gráfica, o usuário final não precisa entender os algoritmos que solucionam os problemas e assim, consegue se concentrar no entendimento das soluções providas na tela final. Além disso, fazer uso de um simulador é uma alternativa didática para introdução ou fixação do conteúdo.

5.2. DEFINIÇÕES BÁSICAS DO SELF.3Ø

O Simulador Didático de Estimação Fasorial e Localização de Faltas em Linhas de Transmissão Trifásicas (SELF3Ø) foi arquitetado com a intenção de atender um determinado grupo específico de atividades, sendo as principais a Estimação Fasorial e a Localização de Faltas. A Tabela 2 apresenta algumas outras particularidades que definem o simulador SELF3Ø.

Tabela 2 - Características Básicas do SELF3Ø

Características	Escolhidas para o SELF3Ø
Linha de Transmissão (quanto ao tipo de fornecimento)	Trifásico
Linha de Transmissão (quanto a transposição)	Linhas Transpostas
Sinais de Entrada	Sinais Discretos
Medição dos Sinais	2 ou 3 Terminais
Estimação Fasorial (com relação ao janelamento de sinais)	Não Recursivos de Janelas Fixas e Recursivos
Localização de Faltas (com relação a técnica escolhida)	Fasores Fundamentais
Índices de Desempenho da Estimação (com relação a constante de tempo)	Independente

Fonte: Autoria Própria (2020)

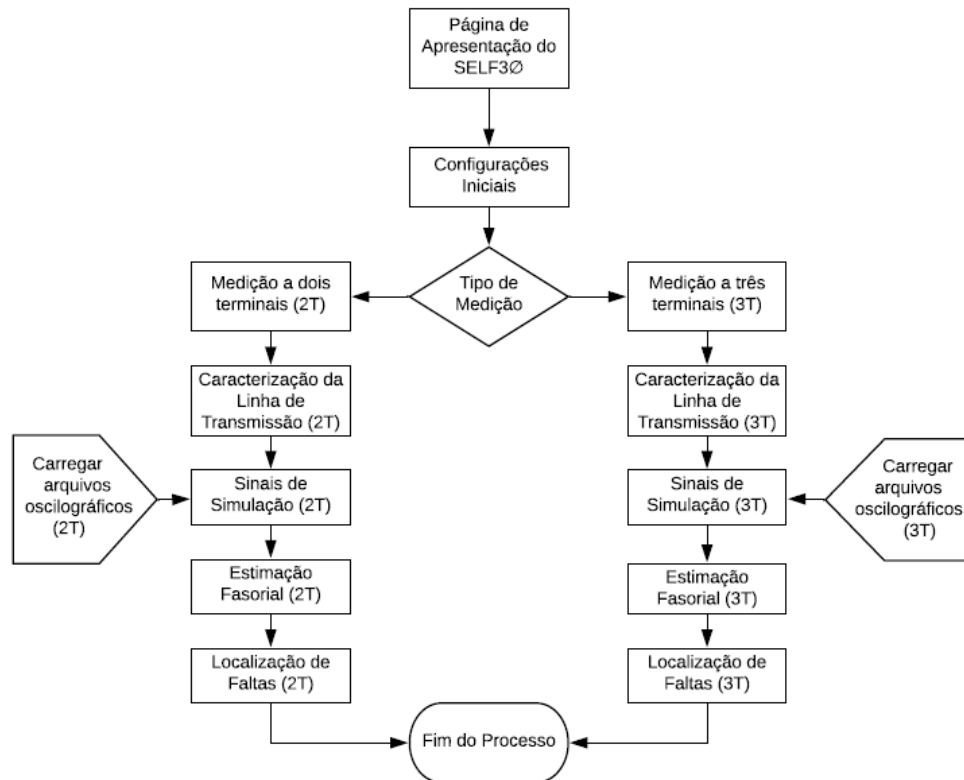
5.3. APRESENTAÇÃO DAS PÁGINAS DO PROGRAMA E SUAS FUNCIONALIDADES

O Simulador Didático de Estimação Fasorial e Localização de Faltas em Linhas de Transmissão Trifásicas (SELF3Ø) foi construído para obedecer uma sequência lógica de processos, de forma a proporcionar para o usuário final um entendimento dos conceitos apresentados com relação a estimação fasorial e localização de faltas.

De forma básica, essa sequência é exposta nas páginas da interface gráfica programada, apresentando: as configurações iniciais do programa, os parâmetros elétricos que caracterizam os trechos de linhas estudadas, os sinais oscilográficos, o processo de estimação fasorial e os procedimentos que envolvem a localização de uma falta elétrica. A Figura 27 apresenta o fluxograma para entendimento do processo de paginação envolvido junto ao simulador.

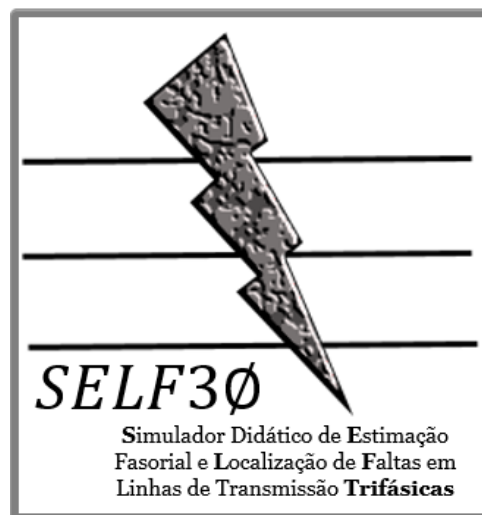
Na sequência apresenta-se o *layout* do simulador e explicações sobre as características de cada página do programa. O objetivo desse tópico é explicar e detalhar os atributos vistos como essenciais para o entendimento de cada página do SELF3Ø. Inicialmente foi idealizado uma logomarca para representar o simulador construído, como mostra a Figura 28.

Figura 27 - Fluxograma das páginas do SELF3Ø



Fonte: Autoria Própria (2020)

Figura 28 - Logomarca do SELF3Ø



Fonte: Autoria Própria (2020)

5.3.1. Página de Apresentação do Programa

A página inicial do SELF3Ø apresenta a logomarca do programa, os objetivos do simulador, e os botões para entrar ou fechar o aplicativo. Além disso, na tela de apresentação e em todas as próximas, sempre é visível no rodapé a sigla do programa, juntamente com a

logomarca em tamanho reduzido e o nome do criador da interface. A Figura 29 apresenta essa tela de apresentação.

Figura 29 - Página Inicial do SELF3Ø



Fonte: Autoria Própria (2020)

5.3.2. Página “Configurações Iniciais”

Após entrar no programa, a próxima página divulgada será a de “Configurações Iniciais”, onde deverá ser definido certas condições primordiais que direcionam a interface para situações diferentes.

Inicialmente, o usuário deverá escolher como é caracterizado o tipo de medição dos sinais na linha de transmissão, podendo escolher entre as medições de dois ou três terminais, obedecendo as topologias apresentadas pelas imagens na interface. A Figura 30 apresenta a tela para a aba de Configurações Iniciais.

Figura 30 - Configurações Iniciais do SELF3Ø

Apresentacao Configurações Iniciais Caract. LT (2T) Caract. LT (3T) Sinais.Simul (2T) Sinais.Simul (3T) Estim.Fasor (2T) Est >

CONFIGURAÇÕES INICIAIS

Tipo de Medição dos Sinais da Linha de Transmissão

Medição a 2 Terminais (2T) Medição a 3 Terminais (3T)

Características da Amostragem

freq.rede (Hz) 0

freq.amost (Hz) 0

N (amostras p/ ciclo) 0

Normalização do SEP

Sbase (MVA) 0

Vbase (kV) 0

SELF3Ø

Desenvolvido por: Cleydson Adler de Castro Nascimento

Fonte: Autoria Própria (2020)

Como os sinais a serem inseridos são discretizados, o usuário deve também preencher o bloco “Características da Amostragem” onde deve ser inserido a frequência da rede, a frequência de amostragem e o número de amostras por ciclo. Esses dados são primordiais para conhecer como é a natureza de amostragem dos dados oscilográficos.

Além disso, nessa tela ainda é definida a normalização do Sistema Elétrico em questão, definindo-se a potência aparente trifásica de base (S_{base}) e a tensão de base eficaz do sistema (V_{base}). Os dados em p.u (sistema por unidade) serão calculados com relação a esses valores de base e utilizados para determinar o ponto do início da falta, através do algoritmo apresentado na seção 3.3.1 deste trabalho.

Em posse desses valores, pode-se prosseguir ou voltar a página anterior com o uso das setas de indicação apresentadas no canto inferior direito da imagem. Como já apresentado, a escolha do tipo de medição (dois ou três terminais) levam a páginas diferentes. Dessa forma, será apresentado a sequência lógica para cada situação nos próximos tópicos.

5.3.3. Escolha por Medição a 2 Terminais

Caso o usuário defina a Medição a 2 Terminais na tela de configurações iniciais, preenchendo todos os dados referentes as características da amostragem e a normalização do sistema elétrico de potência, ele será guiado a página de características da linha de transmissão.

5.3.3.1. Caracterização da Linha de Transmissão

A página em sequência, como mostra a Figura 31, define os parâmetros elétricos que caracterizam a linha de transmissão contida entre as barras emissora e receptora. Os parâmetros que devem ser introduzidos no simulador são: a resistência de sequência zero, a resistência de sequência positiva, a indutância de sequência zero, a indutância de sequência positiva, a capacitância de sequência zero, a capacitância de sequência positiva, todos esses definidos por unidade de comprimento. Além disso, define-se também o comprimento da linha de transmissão.

Figura 31 - Caracterização da LT de 2 Terminais no SELF3Ø

CARACTERIZAÇÃO DA LINHA DE TRANSMISSÃO - 2T

Os parâmetros que representam uma Linha de Transmissão são:

- 1- R0 (Resistência de seq.0 por und. de comprimento)
- 2- R1 (Resistência de seq.+ por und. de comprimento)
- 3- L0 (Indutância de seq.0 por und. de comprimento)
- 4- L1 (Indutância de seq.+ por und. de comprimento)
- 5- C0 (Capacitância de seq.0 por und. de comprimento)
- 6- C1 (Capacitância de seq.1 por und. de comprimento)
- 7- L (comprimento da linha)

Características da LT

R0 (ohms/km) 0.0000000
R1 (ohms/km) 0.0000000
L0 (mH/km) 0.0000000
L1 (mH/km) 0.0000000
C0 (µF/km) 0.0000000
C1 (µF/km) 0.0000000
L (km) 0

SELF3Ø
Desenvolvido por: Cleydson Adler de Castro Nascimento

Fonte: Autoria Própria (2020)

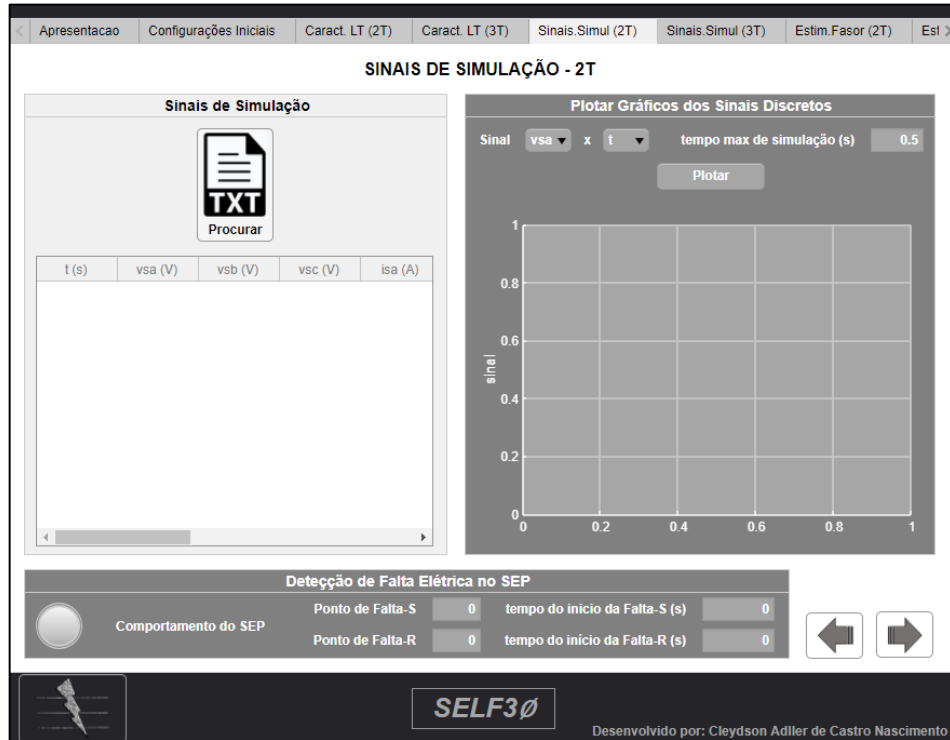
A tela de “Caracterização da Linha de Transmissão - 2T” atribui que só é possível prosseguir para a página seguinte se os valores das resistências e das indutâncias (de sequência positiva e sequência zero), além do comprimento da linha de transmissão forem preenchidos. Dessa forma, é possível simular uma linha de transmissão como modelo de linha curta, onde ignora-se o efeito capacitivo da linha.

5.3.3.2. Aba “Sinais de Simulação-2T”

A tela subsequente, como mostra a Figura 32, solicita ao usuário carregar um arquivo de texto (.txt) que contém os dados dos sinais de tensões e correntes trifásicas de cada terminal

(S ou R). O arquivo deve conter os dados amostrados em vetores e seguindo a ordem apresentada na Tabela 3.

Figura 32-Sinais de Simulação de 2 Terminais no SELF3Ø



Fonte: Autoria Própria (2020)

Tabela 3 - Modo de organização dos dados simulados no arquivo de texto

t	vsa	vsb	vsc	isa	isb	isc	vra	vrb	vrc	ira	irb	irc
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:

Fonte: Autoria Própria (2020)

No momento em que o arquivo de texto é inserido junto a interface gráfica, a planilha de dados, localizada logo abaixo, apresenta essas informações para cada uma das variáveis de tensão, corrente e tempo adicionadas.

O usuário pode observar como se comporta cada um desses sinais discretizados em função do tempo ou do número de amostras, através do bloco “Plotar Gráficos dos Sinais Discretos”. O tempo máximo de simulação aparece como opção para segmentar a curva de modo a priorizar determinadas regiões, como por exemplo, as regiões pré-falta e pós-falta, além de suas interseções.

Por último, existe o bloco localizado na parte inferior da tela, responsável por localizar o ponto de falta e o tempo de início de falta perceptível por cada terminal (S ou R). Devido as características da linha de transmissão e a teoria das ondas viajantes, os sinais não tem o perfil

de falta no mesmo momento, sendo necessário essa distinção. Para uniformizar o ponto de falta a ser considerado para a simulação, escolhe-se o maior ponto obtido visto entre o terminal local (S) e o remoto (R). A escolha desse ponto confirma que todos os dados oscilográficos, a partir da amostra escolhida representam dados pós-falta, característica essa importante para localização de faltas elétricas.

Com o objetivo de apresentar, visualmente, para o usuário a existência ou não da falta, foi colocado uma lâmpada indicativa que identifica o comportamento do SEP com relação a falta. A lógica de cores da lâmpada é apresentada na Tabela 4.

Tabela 4 - Comportamento da lâmpada indicativa

Cor	Comportamento
	Desligado
	Sistema sem Perturbações
	Existência da Falta Elétrica

Fonte: Autoria Própria (2020)

As mesmas cores indicativas também são definidas para a curva que será plotada, mantendo a seguinte lógica: para sinais sem perturbações ou dados pré-falta (cor azul) e para dados de falta (cor vermelha). Uma premissa bastante importante para esse simulador é que deve existir, no mínimo um ciclo pré-falta de dados, fazendo jus a um sistema funcionando com normalidade.

5.3.3.3. Página “Estimação Fasorial-2T”

A Figura 33 apresenta a próxima aba interativa, sendo essa responsável por realizar os cálculos de estimação fasorial dos sinais discretos anteriormente inseridos, apresentar o comportamento gráfico da convergência desses fasores e os respectivos índices de desempenho.

Figura 33 - Estimação Fasorial de 2 Terminais no SELF3Ø

Fonte: Autoria Própria (2020)

O bloco de nome “Métodos de Estimação Fasorial” solicita ao usuário a escolha da técnica para estimar o fasor, a harmônica desejada, o ciclo analisado e se a análise é de um regime pré-falta ou pós-falta. A resposta dos fasores é apresentada no bloco “Fasores”, logo após o usuário clicar no botão “Calcular”. Novamente, vale salientar que o programa foi criado com a premissa de existência de no mínimo, um ciclo de normalidade do sistema (caracterizando um regime pré-falta).

Os algoritmos implementados de estimação fasorial podem ser selecionados na barra suspensa, sendo classificados por siglas de acordo com os dados da Tabela 5. Para o sistema de medição em dois terminais, foi aplicado a sincronização de dados proposta por Monteiro et al. (2018) e exibido no bloco Ângulo de Sincronização.

Tabela 5 - Sigla dos Métodos de Estimação aplicados no SELF3Ø

Método	Sigla
Algoritmo de Fourier de Ciclo Completo	AFCC
Algoritmo de Fourier de Meio Ciclo	AFMC
Filtro Cosseno	FCOS
Filtro Cosseno Modificado	FCSM
Algoritmo de Guo, Kezunovic e Chen	AGKC
Filtro Mímico Digital por Benmouyal	MIMIC

Fonte: Autoria Própria (2020)

Existe também um bloco responsável por apresentar o gráfico da estimação fasorial em um janelamento de dados, mostrando o percurso da resposta do fasor até o seu valor em regime permanente. Assim, torna-se possível representar graficamente o módulo dos fasores em sua componente fundamental ($n=1$).

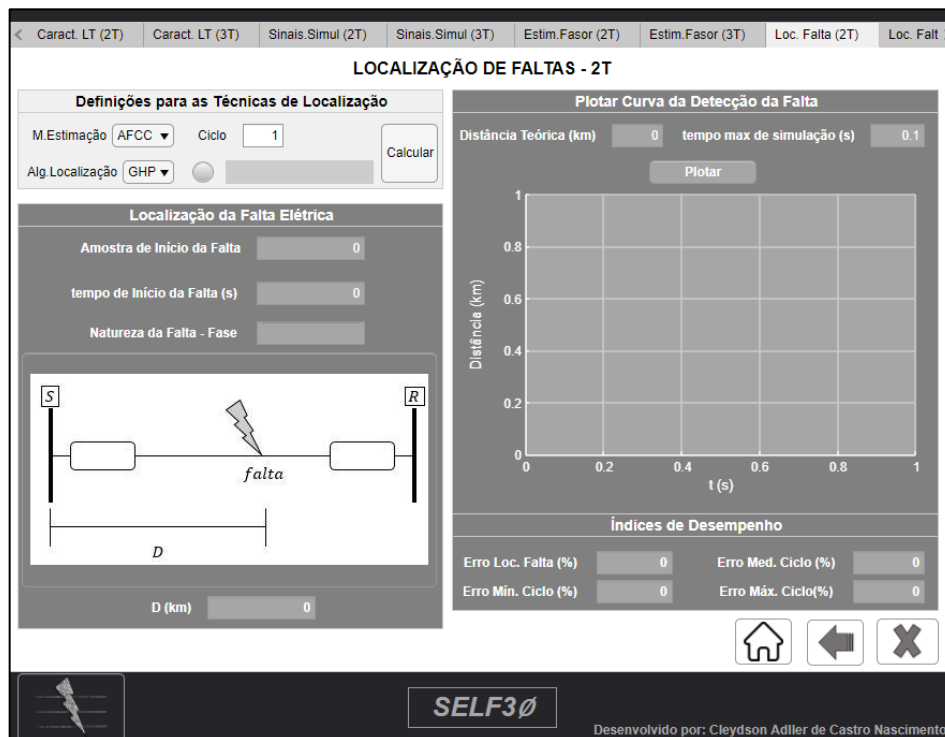
A curva apresentada obedece novamente ao código de cores apresentado na Tabela 4, de modo que: para os fasores que apresentam o comportamento pós-falta se faz uso da cor vermelha e para fasores do sistema sem distúrbios ou em regime pré-falta utiliza-se a cor azul.

Para avaliar a qualidade da estimação fasorial, foram calculados os índices de desempenho ID_1 e ID_2 propostos por Benmouyal (1995, p.621-622), além do índice ID_3 idealizado por Balamourougan e Sidhu (2006, p.4). É importante salientar que os índices de desempenho são calculados para cada situação específica e possuem resultados diferentes até para os regimes de pré ou pós-falta.

5.3.3.4. Tela “Localização de Faltas-2T”

A página final do programa possui o objetivo de identificar o ponto de falta elétrica, as características da falta, mostrar o comportamento gráfico da localização e fazer uma avaliação da mesma baseada em índices de desempenho. A Figura 34 apresenta essa aba do programa.

Figura 34- Localização de Faltas em Sistema com 2 Terminais no SELF3Ø



Fonte: Autoria Própria (2020)

Junto ao bloco “Definições para as Técnicas de Localização” o usuário estabelece: o método de estimação escolhido para calcular os fasores da componente fundamental dos sinais, sendo os mesmos já apresentados na Tabela 5; o algoritmo de localização de faltas a ser utilizado, de acordo com o apresentado na Tabela 6; e o ciclo de análise. Além disso, a página possui uma lâmpada indicativa juntamente com uma área sombreada de exibição de informações que avisam ao usuário a existência ou não da falta. As cores obedecem ao mesmo princípio apresentado na Tabela 4.

Tabela 6- Algoritmos de Localização de Falta implementados no SELF3Ø

Método	Sigla
Algoritmo de Girgis, Hart e Peterson	GHP
Algoritmo de Preston et al.	PRE
Algoritmo de Johns e Jamali	AJJ

Fonte: Autoria Própria (2020)

Dessa forma, caso uma falta elétrica aconteça, os algoritmos da interface são capazes de determinar a amostra de início da falta, o tempo de início da falta, a natureza da falta elétrica (trifásica, bifásica ou monofásica) e a localização da falta.

Caso não exista uma falta caracterizada nos parâmetros elétricos inseridos junto ao simulador, a lâmpada indicativa apresentará a cor azul e ao seu lado uma frase confirmando que o sistema não possui esse tipo de perturbação no sistema. Além disso, todos os blocos de resultados em “Localização da Falta Elétrica”, “Plotar curva de detecção de Falta” e “Índices de Desempenho” serão desativados.

Com o objetivo de perceber, através do janelamento de dados, como o algoritmo de localização se comporta em busca do ponto de falta, utiliza-se o esboço gráfico. Nesse gráfico, caso seja conhecido o valor real (teórico) da localização de falta é possível plotar junto a esse comportamento o próprio valor teórico e além disso calcular os erros de localização.

Os índices de desempenho para localização de falta foram: o erro de localização de falta (%), o erro médio por ciclo (%), o erro mínimo por ciclo (%) e o erro máximo por ciclo (%). Esses coeficientes calculados transmitem o quão preciso foi a localização, se comparado ao seu valor real.

5.3.4. Escolha por Medição a 3 Terminais

Caso o usuário defina a Medição a 3 Terminais na tela de Configurações Iniciais, preenchendo todos os dados referentes as características da amostragem e a normalização do sistema elétrico de potência, ele será guiado a página de características da linha de transmissão.

5.3.4.1. Caracterização da Linha de Transmissão

A página em sequência, como mostra na Figura 35, define os parâmetros elétricos que caracterizam os trechos de linha de transmissão contida entre os três terminais da linha (LS, LR e LP). Percebe-se que os parâmetros elétricos definidos para cada trecho são individuais, e dessa forma, podem representar linhas de transmissão com configurações diferentes.

Os parâmetros alimentados são: a resistência de sequência zero, a resistência de sequência positiva, a indutância de sequência zero, a indutância de sequência positiva, a capacitância de sequência zero, a capacitância de sequência positiva, todos esses definidos por unidade de comprimento. Além disso, define-se também o comprimento da linha de transmissão.

A tela de Caracterização da Linha de Transmissão com 3 terminais atribui que só é possível prosseguir para a página seguinte se os valores das resistências e das indutâncias (de sequência positiva e sequência zero), além do comprimento da linha de transmissão de todos os trechos forem preenchidos. Dessa forma, traz a possibilidade de simular uma linha de transmissão como modelo de linha curta, onde ignora-se o efeito capacitivo da linha.

Figura 35 - Caracterização da LT de 3 Terminais no SELF3Ø

CARACTERIZAÇÃO DA LINHA DE TRANSMISSÃO - 3T

Os parâmetros que representam uma Linha de Transmissão são:

- 1- R0 (Resistência de seq. 0 por und. de comprimento)
- 2- R1 (Resistência de seq. + por und. de comprimento)
- 3- L0 (Indutância de seq. 0 por und. de comprimento)
- 4- L1 (Indutância de seq. + por und. de comprimento)
- 5- C0 (Capacitância de seq. 0 por und. de comprimento)
- 6- C1 (Capacitância de seq. 1 por und. de comprimento)
- 7- L (comprimento da linha)

O barramento T é utilizado como referência. As linhas então são definidas com relação a esse terminal, sendo assim as linhas S-T, R-T e P-T.

Características da LT(S-T)

R0 (ohms/km)	0.0000000
R1 (ohms/km)	0.0000000
L0 (mH/km)	0.0000000
L1 (mH/km)	0.0000000
C0 (µF/km)	0.0000000
C1 (µF/km)	0.0000000
LS (km)	0

Características da LT(R-T)

R0 (ohms/km)	0.0000000
R1 (ohms/km)	0.0000000
L0 (mH/km)	0.0000000
L1 (mH/km)	0.0000000
C0 (µF/km)	0.0000000
C1 (µF/km)	0.0000000
LR (km)	0

Características da LT(P-T)

R0 (ohms/km)	0.0000000
R1 (ohms/km)	0.0000000
L0 (mH/km)	0.0000000
L1 (mH/km)	0.0000000
C0 (µF/km)	0.0000000
C1 (µF/km)	0.0000000
LP (km)	0

SELF3Ø

Desenvolvido por: Cleydson Adler de Castro Nascimento

Fonte: Autoria Própria (2020)

5.3.4.2.Aba “Sinais de Simulação - 3T”

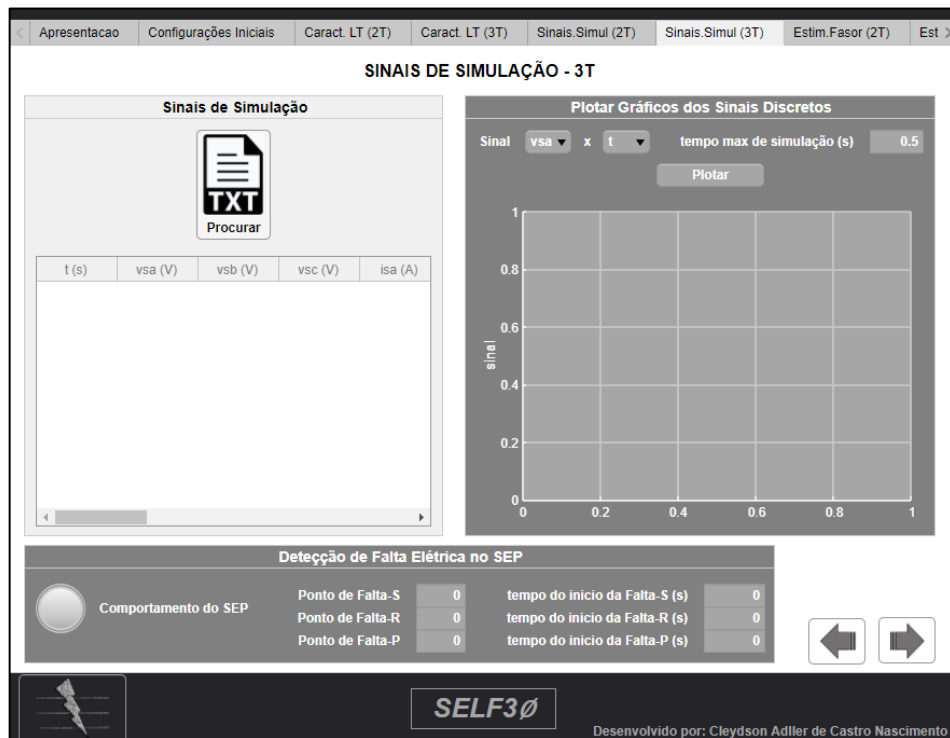
A tela subsequente, como expõe a Figura 36, solicita ao usuário carregar um arquivo de texto (.txt) que contém os dados dos sinais de tensões e correntes trifásicas de cada terminal (S, R ou P). O arquivo deve conter os dados amostrados em vetores e seguindo a ordem apresentada na Tabela 7.

Tabela 7 - Modo de organização dos dados simulados no arquivo de texto

t	vsa	vsb	vsc	isa	isb	isc	vra	vrh	vrc	ira	irb	irc	vpa	vph	vpc	ipa	iph	ipc
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:

Fonte: Autoria Própria (2020)

Figura 36-Sinais de Simulação de 3 Terminais no SELF3Ø



Fonte: Autoria Própria (2020)

No momento em que o arquivo de texto é inserido junto a interface gráfica, a planilha de dados, localizada logo abaixo, apresenta essas informações para cada uma das variáveis de tensão, corrente e tempo adicionadas.

O usuário pode observar como se comporta cada um desses sinais discretizados em função do tempo ou do número de amostras, através do bloco “Plotar Gráficos dos Sinais Discretos”. O tempo máximo de simulação aparece como opção para segmentar a curva de modo a priorizar determinadas regiões.

Por último, existe o bloco localizado na parte inferior da tela, responsável por localizar os pontos de falta e o tempo de início de falta perceptível por cada terminal (S, R ou P). Devido as características da linha de transmissão e a teoria das ondas viajantes, os sinais não tem o perfil de falta no mesmo momento, sendo necessário essa distinção. Nesse sentido, também é definido o ponto de falta único que será considerado para o sistema de medição de três terminais, sendo considerado como o maior dentre os terminais S, R ou P.

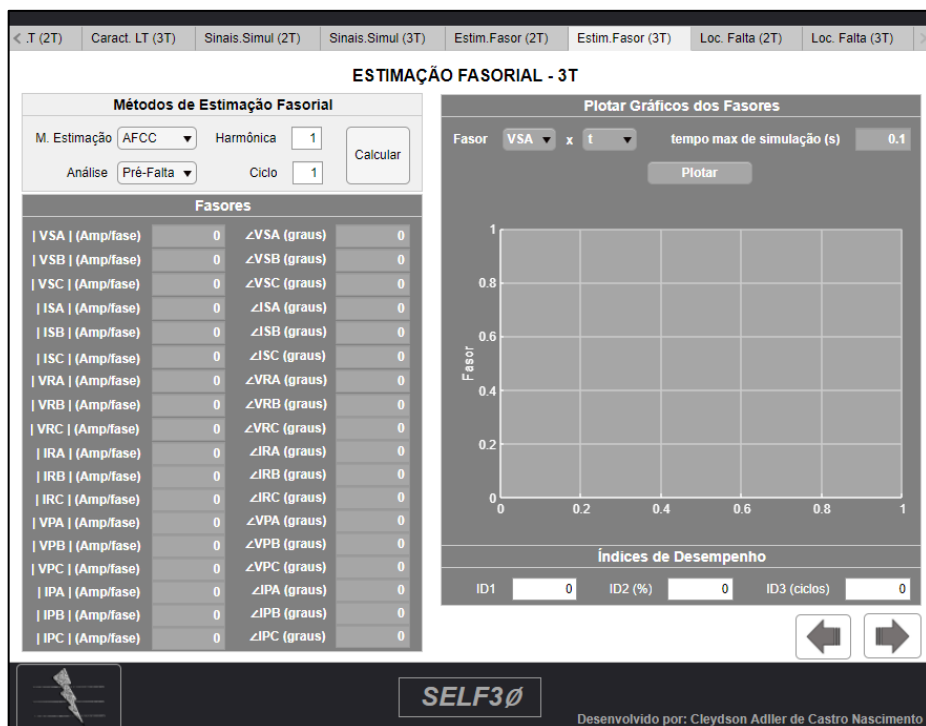
Com o objetivo de apresentar visualmente para o usuário a existência ou não da falta, foi colocado uma lâmpada indicativa que identifica o comportamento do SEP com relação a falta. A lógica de cores da lâmpada obedece ao mesmo princípio da Tabela 4.

As mesmas cores indicativas também são definidas para a curva que será plotada, mantendo a seguinte lógica: para sinais sem perturbações ou dados pré-falta (cor azul) e para dados de falta (cor vermelha). O simulador solicita que deve existir, no mínimo, um ciclo pré-falta de dados, fazendo jus a um sistema funcionando com normalidade.

5.3.4.3. Página “Estimação Fasorial – 3T”

A Figura 37 apresenta a próxima aba interativa, sendo essa responsável por realizar os cálculos de estimação fasorial dos sinais discretos anteriormente inseridos, apresentar o comportamento gráfico da convergência desses fasores e os respectivos índices de desempenho.

Figura 37 - Estimação Fasorial de 3 Terminais no SELF3Ø



Fonte: Autoria Própria (2020)

O bloco de nome “Métodos de Estimação Fasorial” solicita ao usuário a escolha da técnica para estimar o fasor, a harmônica desejada, o ciclo analisado e se a análise é de um regime pré-falta ou pós-falta, caso exista. A resposta dos fasores é apresentada no bloco “Fasores”, logo após o usuário clicar no botão “Calcular”. Novamente, vale salientar que o programa foi criado com a premissa de existência de no mínimo, um ciclo de normalidade do sistema (caracterizando um regime pré-falta).

Os algoritmos implementados de estimação fasorial são os mesmos apresentados para o sistema de 2 terminais, como mostrado na Tabela 5. A medição de três terminais deve possuir os seus dados já de forma sincronizada, visto que não foi implementado nenhum algoritmo de sincronização para realizar a correção.

Existe também um bloco responsável por apresentar o gráfico da estimação fasorial em um janelamento de dados, mostrando o percurso da resposta do fasor até o seu valor em regime permanente. Assim, torna-se possível representar graficamente o módulo dos fasores em sua componente fundamental ($n=1$), visto que apenas esses convergem para um valor em regime permanente.

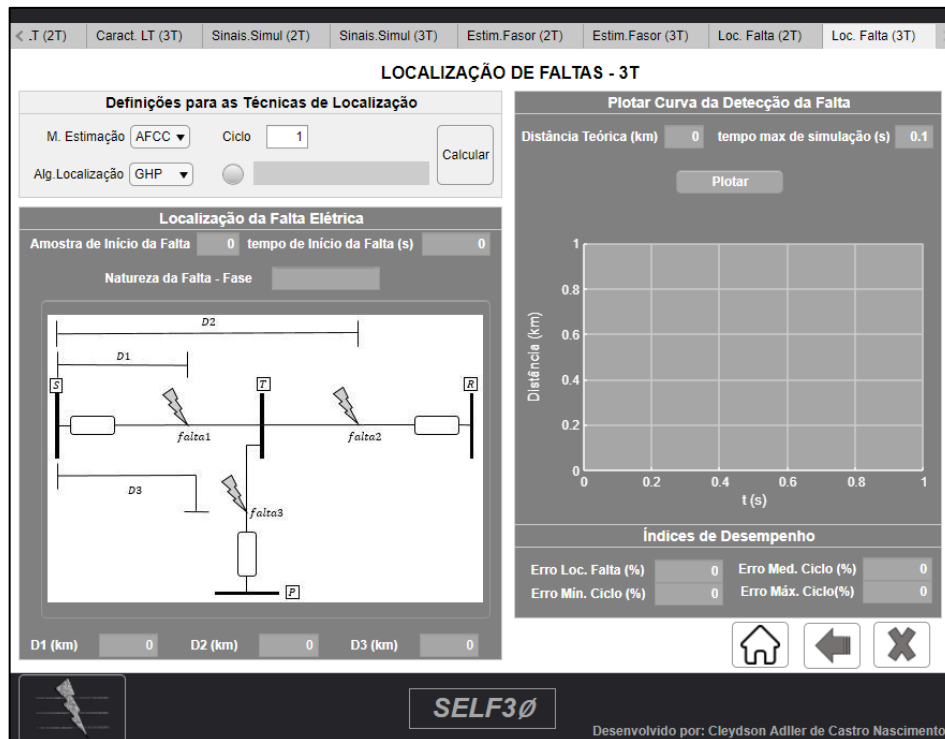
A curva apresentada obedece novamente ao código de cores apresentado na Tabela 4, de modo que: para os fasores que apresentam o comportamento pós-falta se faz uso da cor vermelha e para fasores do sistema sem distúrbios ou em regime pré-falta utiliza-se a cor azul.

Para avaliar a qualidade da estimação fasorial, foi calculado os índices de desempenho ID_1 e ID_2 propostos por Benmouyal (1995, p.621-622), além do índice ID_3 idealizado por Balamourougan e Sidhu (2006, p.4). É importante salientar que os índices de desempenho são calculados para cada situação específica e possuem resultados diferentes até para os regimes de pré ou pós-falta.

5.3.4.4. Tela “Localização de Faltas – 3T”

A página final do programa possui o objetivo de identificar o ponto de falta elétrica (caso exista), as características da falta, mostrar o comportamento gráfico da localização e fazer uma avaliação da mesma baseada em índices de desempenho. A Figura 38 apresenta essa aba do programa.

Figura 38- Localização de Falhas em Sistema com 3 Terminais no SELF3Ø



Fonte: Autoria Própria (2020)

Junto ao bloco “Definições para as Técnicas de Localização” o usuário estabelece: o método de estimação escolhido para calcular os fasores da componente fundamental dos sinais, sendo os mesmos já apresentados na Tabela 5; o algoritmo de localização de falhas a ser utilizado ; e o ciclo de análise. Além disso, a página possui uma lâmpada indicativa juntamente com uma área sombreada de exibição de informações que avisam ao usuário a existência ou não da falta. As cores obedecem ao mesmo princípio apresentado na Tabela 4.

O algoritmo de localização aplicado na interface gráfica foi a técnica proposta por Girgis, Hart e Peterson (1992), que faz uso de medição em três terminais para localizar falhas em três diferentes trechos. O programa decidiu trabalhar sem a simplificação definida por Girgis,Hart e Peterson (1992) em seu artigo e tratou cada trecho com seus parâmetros elétricos individuais.

Dessa forma, caso uma falta elétrica aconteça, o algoritmo da interface é capaz de determinar a amostra de início da falta, o tempo de início da falta, a natureza da falta elétrica (trifásica, bifásica ou monofásica), a localização da falta e o tipo da falta (D1, D2 ou D3).

Com o objetivo de perceber, através do janelamento de dados, como o algoritmo de localização se comporta em busca do ponto de falta, utiliza-se o esboço gráfico. Nesse gráfico,

caso seja conhecido o valor real (teórico) da localização de falta é possível plotar junto a esse comportamento o próprio valor teórico e além disso calcular os erros de localização.

Os índices de desempenho para localização de faltas foram: o erro de localização de falta (%), o erro médio por ciclo (%), o erro mínimo por ciclo (%) e o erro máximo por ciclo (%). Esses coeficientes calculados transmitem o quão preciso foi a localização, se comparado ao seu valor real.

5.4. CARACTERÍSTICAS DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO SIMULADAS

O estudo foi realizado para três tipos de linhas de transmissão, sendo elas de 138 kV, 230 kV e 500 kV. Esses parâmetros elétricos foram expostos por Camargo (2006) e representam linhas típicas da Eletrosul (2009) com características abordadas nas Tabelas 8, 9 e 10. As simulações podem utilizar de quaisquer parâmetros elétricos conhecidos. Nesse trabalho se fez uso dos parâmetros típicos apresentados nas tabelas abaixo, proporções ou combinações dessas.

Tabela 8 - Parâmetros para uma LT de 138 kV

Sequência	Resistência (Ω/km)	Reatância (Ω/km)	Capacitância (nF/km)
Zero	0,4163817	1,69306	5,5
Positiva	0,115674	0,46218	9,54

Fonte: Autoria Própria (2020)

Tabela 9 - Parâmetros para uma LT de 230 kV

Sequência	Resistência (Ω/km)	Reatância (Ω/km)	Capacitância (nF/km)
Zero	0,44016	1,5659	6,1
Positiva	0,09127	0,51879	8,47

Fonte: Autoria Própria (2020)

Tabela 10 - Parâmetros para uma LT de 500 kV

Sequência	Resistência (Ω/km)	Reatância (Ω/km)	Capacitância (nF/km)
Zero	0,3777	1,4238	8,58
Positiva	0,0221	0,3212	13,46

Fonte: Autoria Própria (2020)

5.5. MODELO DA REDE ADOTADA

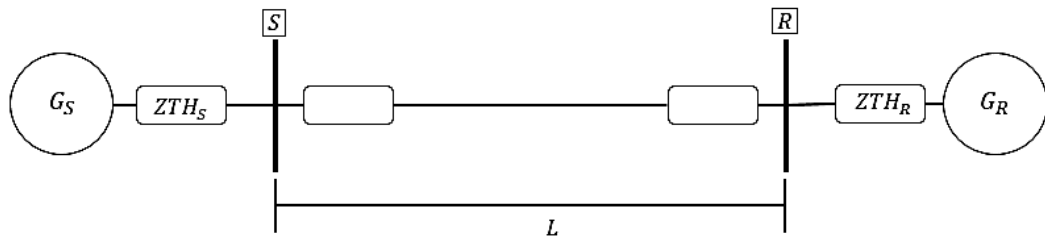
Os sistemas de potência necessários para as medições de dois e três terminais foram modelados e simulados através do *software Alternative Transients Programs (ATP)*. De acordo com a quantidade de medições (dois ou três terminais) a configuração do sistema é modificada.

5.5.1. Sistema para Medição com Dois Terminais

Para o SEP com medições a dois terminais, foi simulado um sistema como mostra a Figura 39, que considera: dois geradores (G_S e G_R), duas impedâncias equivalentes que representam as características do SEP a montante (ZTH_S e ZTH_R), e a zona de detecção de falta localizada entre os dois terminais (S e R), onde será obtido os sinais de tensões e correntes do comportamento do sistema.

Os valores nominais das tensões dos geradores, impedâncias equivalentes e características da linha de transmissão (parâmetros elétricos e seu comprimento) são definidas de acordo com cada simulação.

Figura 39 - SEP adotado para simulação de 2 Terminais



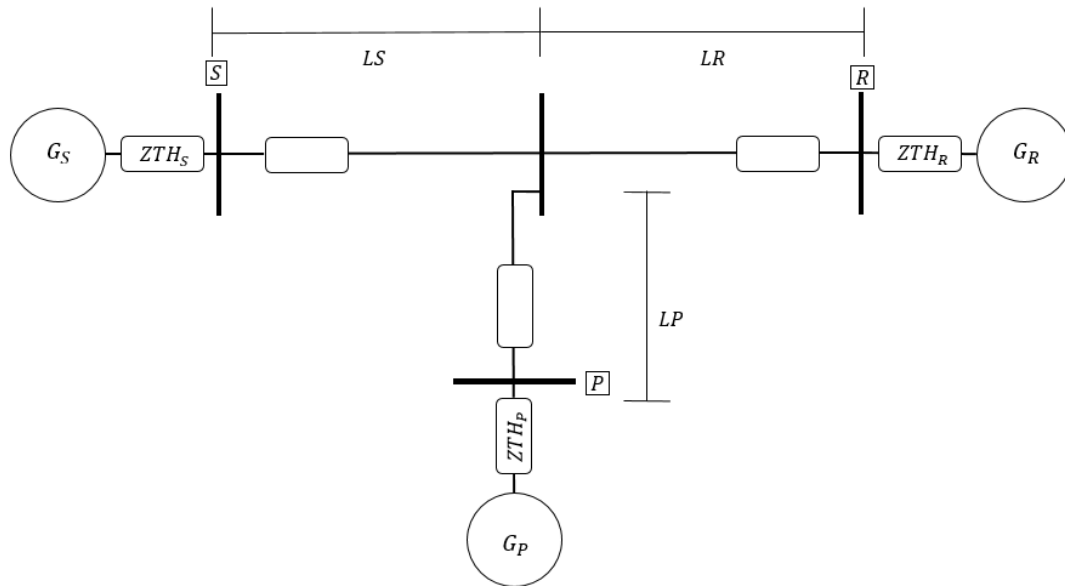
Fonte: Autoria Própria (2020)

5.5.2. Sistema para Medição com Três Terminais

Para o SEP com medições a três terminais, foi simulado um sistema como mostra a Figura 40, que considera: três geradores (G_S , G_R e G_P), três impedâncias equivalentes que representam as características do SEP a montante (ZTH_S , ZTH_R e ZTH_P), e a zona de detecção de falta localizada entre os três terminais (S , R e P), onde será obtido os sinais de tensões e correntes do comportamento do sistema.

Os valores nominais das tensões dos geradores, impedâncias equivalentes e características da linha de transmissão (parâmetros elétricos e seu comprimento) são definidas de acordo com cada simulação.

Figura 40 – SEP adotado para simulação de 2 Terminais



Fonte: Autoria Própria (2020)

5.6. SIMULAÇÕES COM O SELF3Ø

As simulações junto ao SELF3Ø podem ser feitas com inúmeras possibilidades de testes, visto que o sistema permite reproduzir quaisquer tipos de linhas, com medições de dois e três terminais, junto a diversos métodos de estimação fasorial e localização de faltas elétricas. Com o objetivo de validar o simulador, são realizadas simulações, variando-se os parâmetros de acordo com o que é apresentado na Tabela 11.

Tabela 11 - Parâmetros para definição das simulações

Parâmetros	Opções
Tipo de Medição	2 Terminais (2T) ou 3 Terminais (3T)
Nível de Tensão da LT e seus parâmetros	138 kV, 230 kV e 500 kV
Tipos de Dados (com relação a sincronismo)	Síncronos ou Assíncronos
Comprimento das LT	90 km (138 kV) 180 km (230 kV) 250 km (500 kV)
Comprimento dos circuitos equivalentes (ZTH)	A definir na simulação
Nível de tensão nos terminais (S, R e P)	A definir na simulação
Método de Estimação Fasorial	AFCC, AFMC, FCOS, FCSM, AGKC e MIMIC
Falta Elétrica (com relação a sua existência)	Com ou sem Falta
Ciclo de Ocorrência da Falta (caso exista)	A definir na simulação
Tipo da Falta Elétrica	Monofásica, Bifásica ou Trifásica
Local Teórico da Falta Elétrica	25%, 50%, 75% da LT
Algoritmo de Localização da Falta	GHP, PRE e AJJ (2 Terminais) GHP (3 Terminais)

Fonte: Autoria Própria (2020)

6. SIMULAÇÕES COM O SELF3Ø

Os cenários consideram sempre uma existência de falta, de forma a apresentar situações de pré e pós-falta, deixando o resultado o mais completo possível. Neste trabalho realiza-se a simulação de cinco cenários, sendo três cenários para medições com dois terminais e dois cenários para medições com três terminais.

Ao saber que a única diferença entre as características do sistema para as medições são os algoritmos de localização, da forma que: para medição a dois terminais a distância da falta pode ser mensurada através dos algoritmos GHP, PRE e AJJ; e para a medição com um sistema a três terminais, localiza-se a falta com uma adaptação do método de GHP para essa topologia.

Para esses cenários descritos abaixo, foram definidos valores fixos de frequência da rede, frequência de amostragem, números de amostras por ciclo e potência aparente de base, como mostra a Tabela 12. O objetivo disso é se preocupar com as modificações de outros parâmetros, tais como apresentados na Tabela 11.

Tabela 12 - Parâmetros necessários para Configurações Iniciais das Simulações

Parâmetro	Valor
Frequência da rede	60 Hz
Frequência de Amostragem	15360 Hz
Nº de Amostras por Ciclo	256
Potência Aparente de Base	100 MVA

Fonte: Autoria Própria (2020)

Evita-se apresentar as imagens e explicações das telas de “ Configurações Iniciais ” e “ Caracterização da Linha de Transmissão”, visto que essas páginas não representam resultados e devem ser preenchidas pelo usuário com os valores típicos para cada cenário de simulação inserido junto ao SELF3Ø.

6.1.CENÁRIO 1 – LT 138 KV, 2 TERMINAIS E FALTA MONOFÁSICA

Em sequência apresenta-se para a interface gráfica um cenário com dados de tensão e corrente trifásicas para um sistema de medição com dois terminais, onde em um determinado instante de tempo, surge uma falta elétrica. A Tabela 13 apresenta as características desse sistema elétrico.

Tabela 13 - Parâmetros do Cenário 1

Parâmetros	Opções
Tipo de Medição	2 Terminais
Nível de Tensão da LT e seus parâmetros	138 kV
Tipos de Dados (com relação a sincronismo)	Sincronizados
Comprimento das LT	90 km (138 kV)
Comprimento dos circuitos equivalentes (Z_{TH})	20 km
Nível de tensão nos terminais (S, R e P)	$V_S = 1,04 \angle 0^\circ$ p.u $V_R = 0.96 \angle -10^\circ$ p.u
Método de Estimação Fasorial Base	AFCC
Falta Elétrica (com relação a sua existência)	Com Falta
Ciclo de Ocorrência da Falta (caso exista)	12º Ciclo
Tipo da Falta Elétrica	Monofásica – Fase A
Local Teórico da Falta Elétrica	67.5 km (75% da LT)
Algoritmo de Localização da Falta	GHP, PRE e AJJ

Fonte: Autoria Própria (2020)

Os parâmetros das telas “ Configurações Iniciais ” e “ Caracterização da Linha de Transmissão – 2T ” são preenchidos conforme apresentado nas Tabelas 8, 12 e 13. Escolhe-se a tensão de base como a do valor eficaz da linha de transmissão, no caso 138 kV.

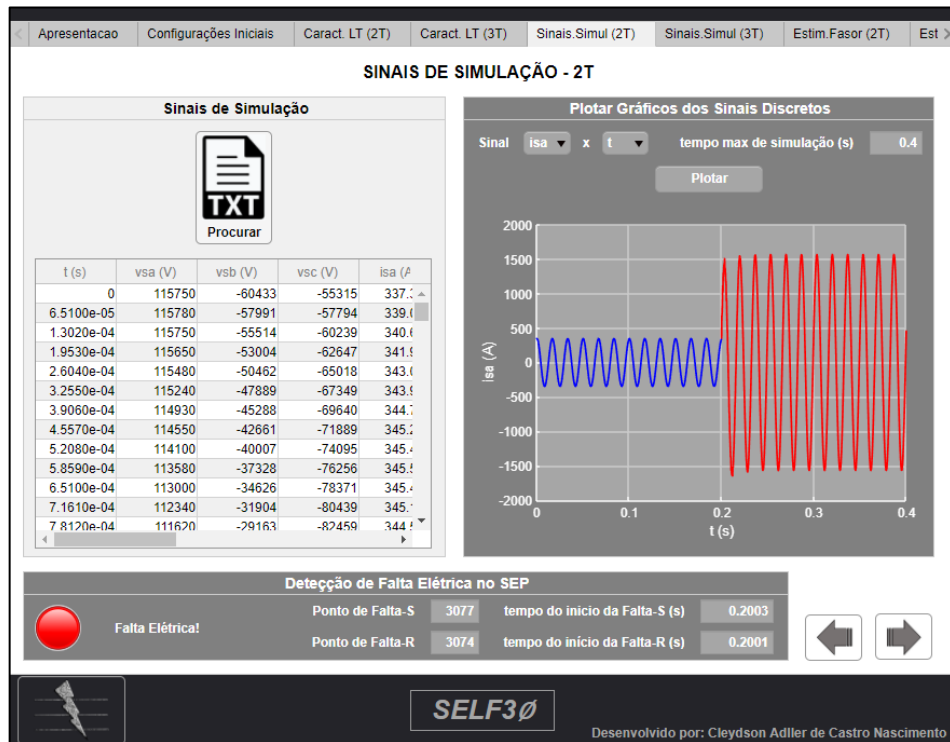
Sabe-se que o comportamento da corrente elétrica é decisivo para determinar a existência ou não de uma falta em um sistema de potência. Desse modo, como os dados amostrados repercutem uma falta monofásica na fase A do SEP, será observado para fins de resultado apenas a corrente da fase a do terminal s (i_{sa}). Outros resultados dos sinais podem ser observados junto ao Apêndice A.

6.1.1. Página “Sinais de Simulação – 2T”

O usuário, ao inserir o arquivo do tipo “.txt”, que contém os sinais dos medidores localizados nos terminais S e R da linha de transmissão, pode perceber que esses dados serão apresentados em forma de planilha logo após serem inseridos, como mostra a Figura 41.

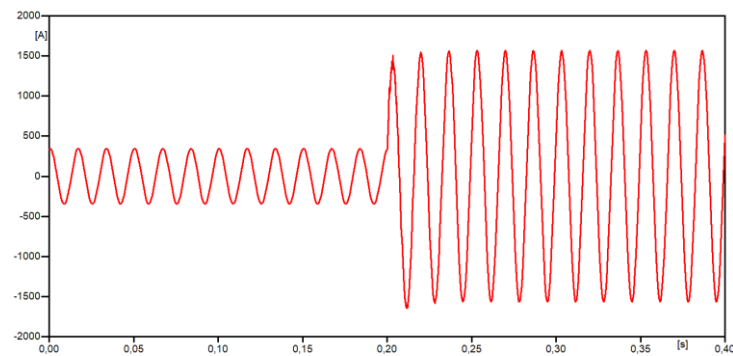
Ao clicar em “Plotar”, percebe-se que o sinal escolhido (o sinal i_{sa}) é apresentado no plano cartesiano do gráfico. A cor em azul evidencia o sinal no regime pré-falta e a cor vermelha, consequentemente, o regime pós-falta. Com intuito de validar a curva do sinal apresentado, faz-se a comparação com o sinal apresentado pelo *software* ATP, mostrado na Figura 42 e percebe-se que representam exatamente os mesmos dados. Foi realizado os mesmos testes para todos os outros sinais medidos no terminal S dos dados captados e verifica-se a mesma exatidão.

Figura 41 - Página "Sinais de Simulação-2T" para Cenário 1 e sinal *isa*



Fonte: Autoria Própria (2020)

Figura 42 - Sinal *isa* apresentado no software ATP para o Cenário 1



Fonte: ATP (2020)

Como a simulação retrata um sistema com perturbações, é perceptível no bloco “Detecção de Falta Elétrica no SEP” a lâmpada indicativa em cor vermelha e os pontos de falta e tempo do início da falta preenchidos, como mostra a Figuras 41. A Tabela 14 apresenta os valores dos pontos de falta e dos tempos do início da falta teóricos e através do SELF3Ø.

Tabela 14 - Ponto de falta e Tempo de Falta para o Cenário 1

Detecção da Falta	Teórico	SELF3Ø - Terminal S	SELF3Ø - Terminal R
Amostra de início	3072	3077	3074
Tempo de início (s)	0,20	0,2003	0,2001

Fonte: Autoria Própria (2020)

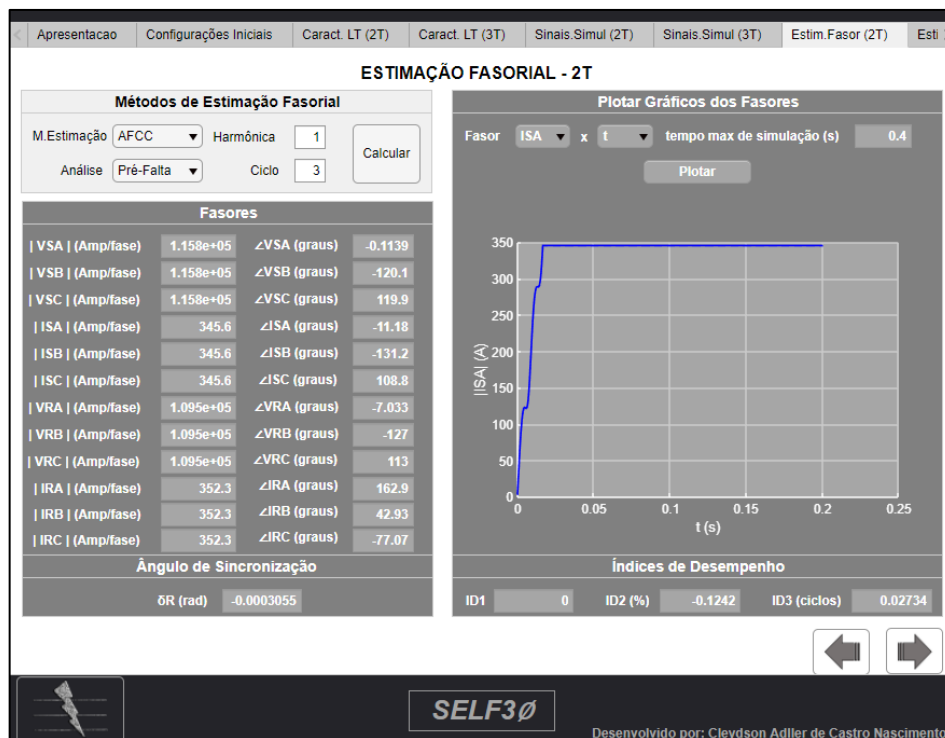
6.1.2. Página “Estimação Fasorial -2T”

Devido a existência de uma falta elétrica no sistema de potência simulado e das características do simulador, surgem fasores de dados em regime de pré-falta e pós-falta e assim, torna-se necessário dividir esse estudo de estimação fasorial nessas duas análises. Para simular os fasores define-se a harmônica fundamental (harmônica=1) a partir do terceiro ciclo de amostras. Os fasores escolhidos são sempre definidos uma amostra após o ciclo desejado.

6.1.2.1. Fasores Pré-Falta

A Figura 43 apresenta a página de estimação do SELF3Ø com os valores calculados para um regime pré-falta. Com o objetivo de validar também a estimação fasorial da interface gráfica, esses fasores são calculados para o 3º Ciclo de amostras com base no Algoritmo de Fourier de Ciclo Completo (AFCC), única técnica de estimação apresentada no *software* ATP.

Figura 43 - Página "Estimação Fasorial -2T" Pré-Falta para Cenário 1



Fonte: Autoria Própria (2020)

Para validação da estimação fasorial, compara-se os fasores calculados através do *software* ATP e do SELF3Ø, como mostra a Tabela 15, onde percebe-se que os resultados são semelhantes em módulo e divergem nos ângulos de fase. Isso acontece devido ao ATP considerar como referência angular fasorial o ângulo de 90° (representação de um fasor através de uma função seno) e o SELF3Ø faz referência a um fasor no ângulo de 0° (representação de

um fasor através de uma função cosseno) e ambos são corretos visto que a diferença é apenas questão de referencial.

A fins didáticos, a referência proposta pelo SELF3Ø agrega maior aplicabilidade nas disciplinas da engenharia elétrica (como sistemas elétricos e transmissão de energia elétrica) que modelam os circuitos trifásicos obedecendo a relação angular $[1\angle 0^\circ \quad 1\angle -120^\circ \quad 1\angle 120^\circ]$, baseada em fasores com referências do tipo cosseno.

Tabela 15 - Fasores pré-falta estimados para frequência fundamental e 3º Ciclo junto ao Cenário 1

Fasor Pré-Falta (3º Ciclo)	ATP (AFCC)	SELF3Ø (AFCC)
VSA	$1,158 \cdot 10^5 \angle 89,89^\circ$	$1,158 \cdot 10^5 \angle -0,1139^\circ$
VSB	$1,158 \cdot 10^5 \angle -30,11^\circ$	$1,158 \cdot 10^5 \angle -120,1^\circ$
VSC	$1,158 \cdot 10^5 \angle -150,1^\circ$	$1,158 \cdot 10^5 \angle 119,9^\circ$
ISA	$345,6 \angle 78,82^\circ$	$345,6 \angle -11,18^\circ$
ISB	$345,6 \angle -41,18^\circ$	$345,6 \angle -131,2^\circ$
ISC	$345,6 \angle -161,2^\circ$	$345,6 \angle 108,8^\circ$
VRA	$1,095 \cdot 10^5 \angle 82,97^\circ$	$1,095 \cdot 10^5 \angle -7,03^\circ$
VRB	$1,095 \cdot 10^5 \angle -37,03^\circ$	$1,095 \cdot 10^5 \angle -127^\circ$
VRC	$1,095 \cdot 10^5 \angle -157^\circ$	$1,095 \cdot 10^5 \angle 113^\circ$
IRA	$352,3 \angle -107,1^\circ$	$352,3 \angle 162,9^\circ$
IRB	$352,3 \angle 132,9^\circ$	$352,3 \angle 42,93^\circ$
IRC	$352,3 \angle 12,93^\circ$	$352,3 \angle -77,07^\circ$

Fonte: Autoria Própria (2020)

Foi realizado os mesmos testes para todos os outros métodos de estimação fasorial disponíveis no simulador SELF3Ø (AFMC, FCOS, FCSM, AGKC e MIMIC) e os valores obedecem ao esperado em teoria, normalmente com variações nos ângulos dos fasores, em virtude das características inerentes dos filtros aplicados em cada técnica de estimação. A Tabela AP1 do Apêndice A apresenta os resultados para cada método de estimação adicional.

Os dados simulados nesse cenário são, teoricamente, sincronizados e não necessitam de algoritmo para sincronismo. O Algoritmo de Sincronização, por sua vez, encontrou pequenos ângulos de sincronização para cada algoritmo de localização utilizado, como apresentado na Tabela 16.

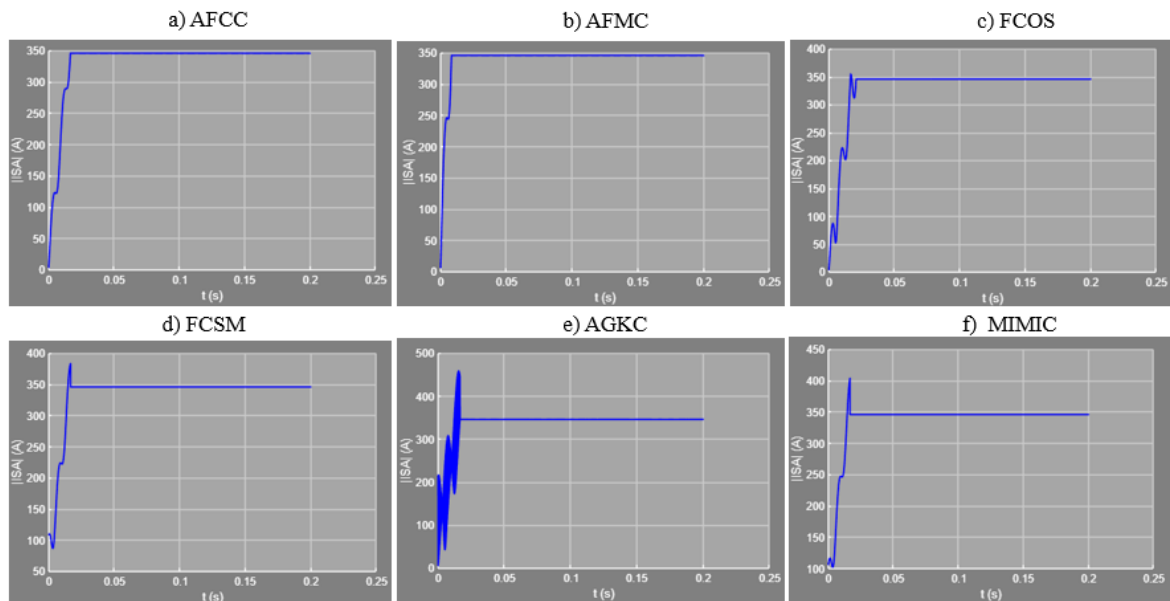
Tabela 16 - Ângulos de sincronização para o Cenário 1

Sincronização	Teórico	AFCC	AFMC	FCOS	FCSM	AGKC	MIMIC
δ (rad)	0	-0,00030	-0,00030	-0,00030	-0,1286	-0,00037	-0,00031

Fonte: Autoria Própria (2020)

A Figura 44 apresenta o comportamento do janelamento para o fasor ISA considerando os métodos de estimação disponíveis junto ao SELF3Ø, de forma que esse gráfico pode ser utilizado para analisar os fasores de pré-falta. Os valores dos índices de despenho (ID_1 , ID_2 e ID_3) para a curva que representa a estimação pré-falta para o fasor ISA é apresentado na Tabela AP2 do Apêndice A.

Figura 44 - Curva do janelamento de dados para estimação fasorial da corrente ISA pré-falta no Cenário 1



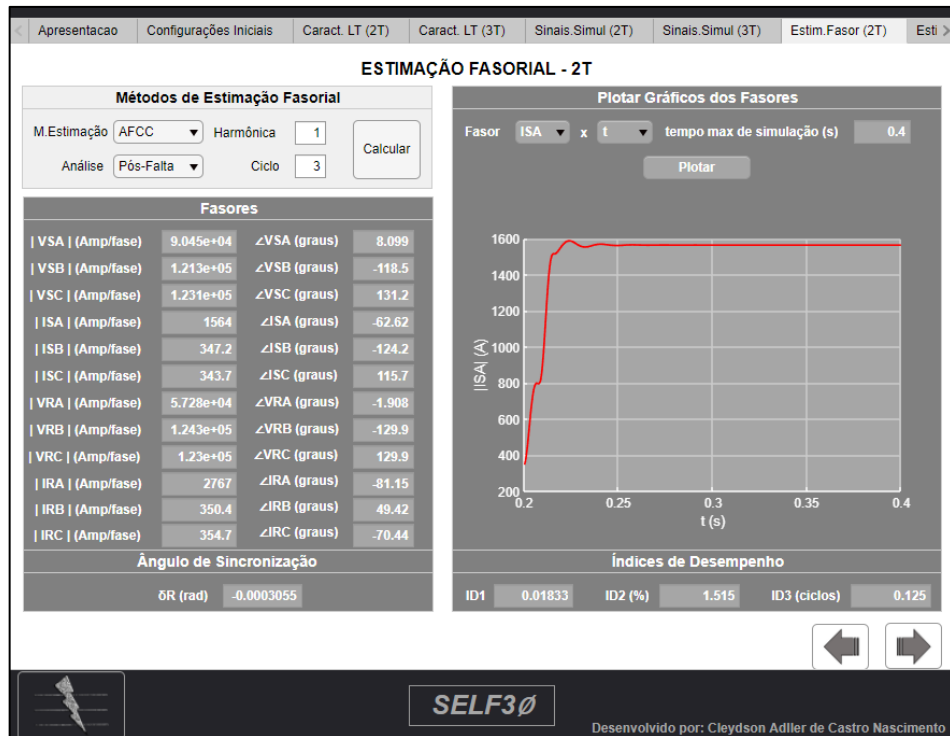
Fonte: Autoria Própria (2020)

6.1.2.2. Fasores Pós-Falta

No propósito de se obter também os fasores pós-falta dessa simulação, modifica-se o item “Análise” para o item “Pós-Falta” junto a página “Estimação Fasorial -2T”. A Figura 45 apresenta a página de estimação do SELF3Ø com os valores calculados para um regime pós-falta.

Com o objetivo de validar também a estimação fasorial da interface gráfica, esses fasores são calculados para o 3º Ciclo de amostras com base no Algoritmo de Fourier de Ciclo Completo (AFCC), única técnica de estimação apresentada no *software* ATP. Os resultados para comparação são expostos junto a Tabela 17.

Figura 45 - Página "Estimação Fasorial -2T" Pós-Falta para Cenário 1



Fonte: Autoria Própria (2020)

Tabela 17 - Fasores pós-falta estimados para frequência fundamental e 3º Ciclo junto ao Cenário 1

Fasor Pós-Falta (3º Ciclo)	ATP (AFCC)	SELF3Ø (AFCC)
VSA	$9,042 \cdot 10^4 \angle 91,07^\circ$	$9,045 \cdot 10^4 \angle 8,099^\circ$
VSB	$1,214 \cdot 10^5 \angle -35,55^\circ$	$1,213 \cdot 10^5 \angle -118,5^\circ$
VSC	$1,231 \cdot 10^5 \angle -145,8^\circ$	$1,231 \cdot 10^5 \angle 131,2^\circ$
ISA	$1564 \angle 20,33^\circ$	$1564 \angle -62,62^\circ$
ISB	$347,2 \angle -41,24^\circ$	$347,2 \angle -124,2^\circ$
ISC	$343,7 \angle -161,3^\circ$	$343,7 \angle 115,7^\circ$
VRA	$5,727 \cdot 10^4 \angle 81,06^\circ$	$5,728 \cdot 10^4 \angle -1,908^\circ$
VRB	$1,243 \cdot 10^5 \angle -46,99^\circ$	$1,243 \cdot 10^5 \angle -129,9^\circ$
VRC	$1,231 \cdot 10^5 \angle -147,1^\circ$	$1,23 \cdot 10^5 \angle 129,9^\circ$
IRA	$2767 \angle 1,802^\circ$	$2767 \angle -81,15^\circ$
IRB	$350,5 \angle 132,4^\circ$	$350,4 \angle 49,42^\circ$
IRC	$354,7 \angle 12,54^\circ$	$354,7 \angle -70,44^\circ$

Fonte: Autoria Própria (2020)

Observando a Tabela 17, nota-se a diferença de resultados entre os fasores, tanto com relação aos módulos, como também a respeito dos ângulos de fase, comparando os resultados obtidos junto ao ATP e SELF3Ø. Essa diferença de resultados pode ser entendida basicamente devido aos fasores estimados junto ao ATP fazerem uso de amostras a partir do valor teórico

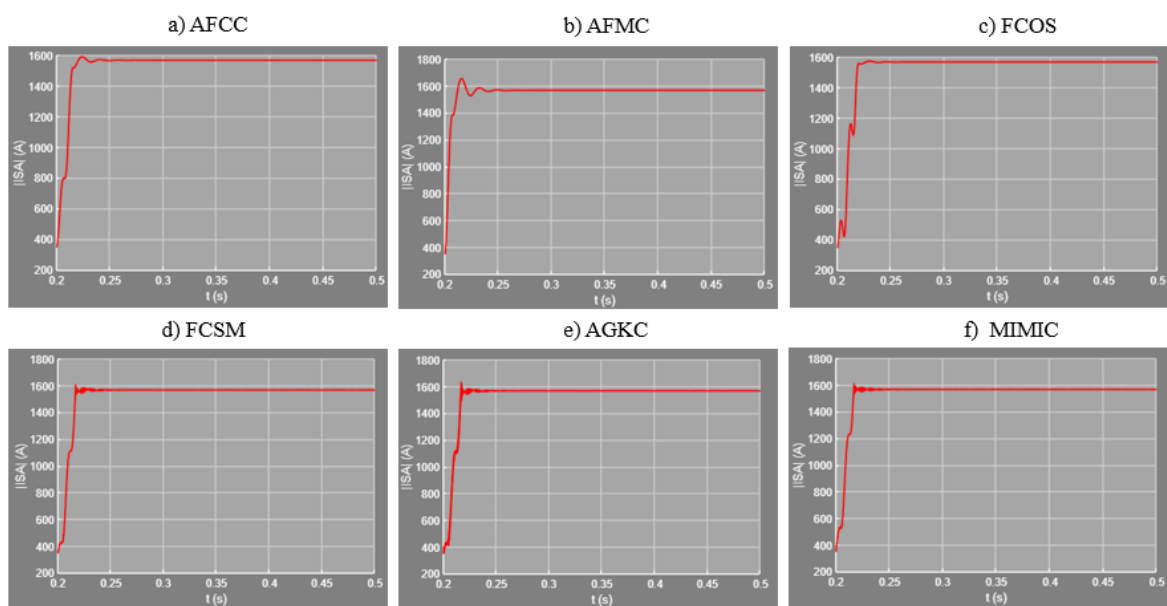
da falta (0,2 s) e os fasores calculados junto ao SELF3Ø utilizarem de um algoritmo de localização de ponto de falta (detectando 0,2003 s).

Esse contraste do ponto de início de falta proporciona um deslocamento na janela de dados (de cinco amostras, nesse cenário), projetando assim uma assim essa diferença entre os fasores estimados. Vale salientar que os fasores estimados através dos dois *softwares* apresentam resultados próximos e aceitáveis, porém, dados apresentados junto ao SELF3Ø garantem uma análise apenas com dados pós-falta dos terminais medidores, característica essa essencial para aplicação nos algoritmos de localização de faltas.

Foi realizado os mesmos testes para todos os outros métodos de estimação fasorial disponíveis no simulador SELF3Ø (AFMC, FCOS, FCSM, AGKC e MIMIC) e os resultados de estimação foram obtidos, normalmente com variações nos ângulos dos fasores, em virtude das características inerentes dos filtros aplicados em cada técnica de estimação. A Tabela AP3 do Apêndice A apresenta os resultados para cada método de estimação adicional.

A Figura 46 apresenta o comportamento do janelamento para o fasor ISA considerando os métodos de estimação disponíveis junto ao SELF3Ø, de forma que esse gráfico pode ser utilizado para analisar os fasores de pós-falta. Os valores dos índices de despenho (ID_1 , ID_2 e ID_3) para a curva que representa a estimação pós-falta para o fasor ISA é apresentado na Tabela AP4 do Apêndice A.

Figura 46 - Curva do janelamento de dados para estimação fasorial da corrente ISA pós-falta no Cenário 1



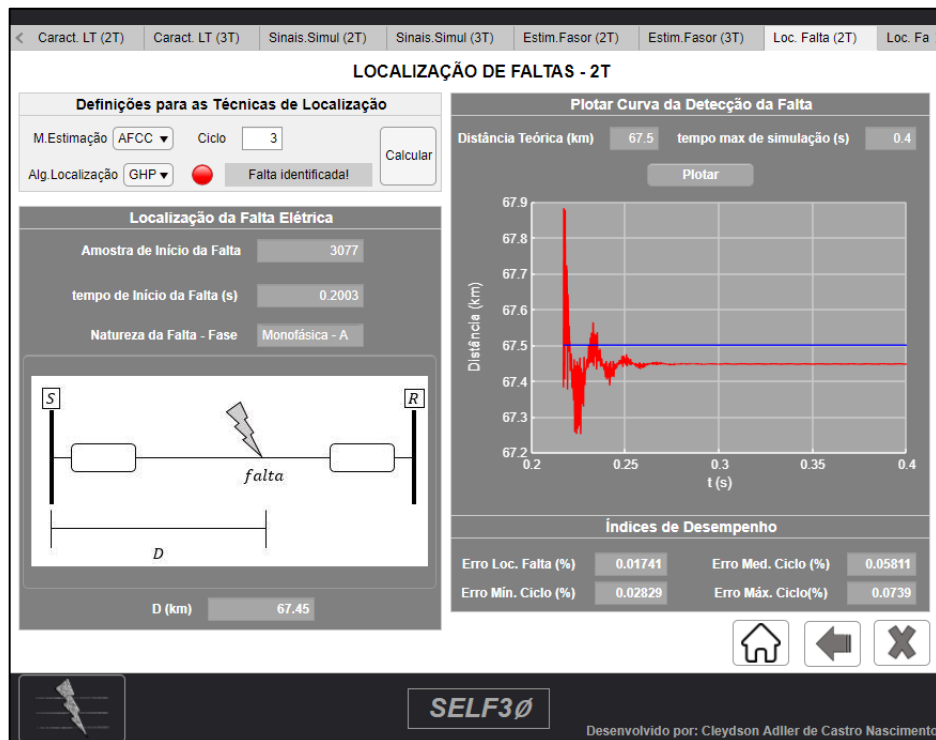
Fonte: Autoria Própria (2020)

6.1.3. Página “Localização de Faltas -2T”

Devido a existência de uma falta no sistema simulado, a aba de localização de faltas consegue determinar a distância de falta vista a partir do terminal S. A lâmpada indicadora em cor vermelha (indicando a presença do sinistro), aponta a possibilidade de estimar o local da falta.

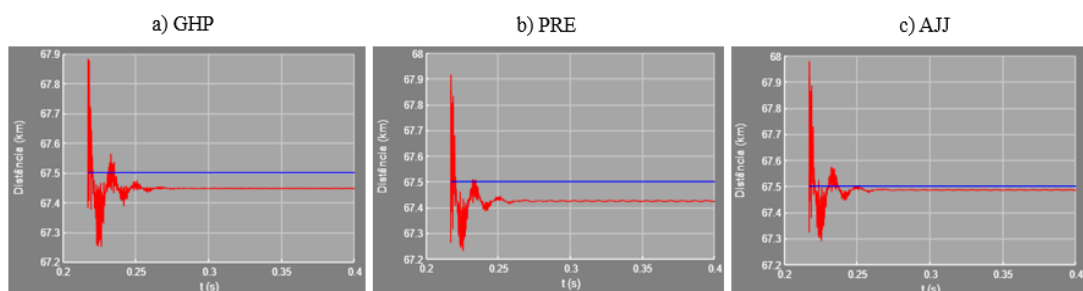
A tela “Localização de Faltas -2T”, apresentada na Figura 47, mostra em seus resultados a amostra do início, o tempo inicial e a natureza da falta e a localização da falta (D). A Figura 48, por sua vez, apresenta o comportamento gráfico para convergência dos algoritmos de localização de faltas. Percebe-se nesse caso que, o algoritmo AJJ converge para resultados mais próximos da teoria.

Figura 47 - Página "Localização de Faltas - 2T" relativo ao Cenário 1



Fonte: Autoria Própria (2020)

Figura 48 - Comportamento Gráfico da localização de falta para o Cenário 1



Fonte: Autoria Própria (2020)

A Tabela 18 apresenta os valores calculados utilizando o AFCC (estimado para o 3º Ciclo) e para os diversos métodos de localização de falta contidos no simulador. Os resultados para localização usando outros algoritmos de estimação estão localizados, respectivamente na Tabela AP5 do Apêndice A.

Tabela 18 - Localização da Falta para o Cenário 1

Localização da Falta D	Teórico	GHP	PRE	AJJ
AFCC – 3º Ciclo	67,5 km	67,45 km	67,44 km	67,5 km

Fonte: Autoria Própria (2020)

Devido à complexidade para apresentar todos os índices de desempenho de localização, visto que eles podem ser modificados em virtude do método de estimação, do algoritmo de localização de faltas ou da combinação entre eles, escolhe-se apresentar apenas o erro médio por ciclo ($\overline{\varepsilon_{ciclo}}$), através da Tabela 19.

Tabela 19 - Erro Médio por Ciclo para o Cenário 1

$\overline{\varepsilon_{ciclo}}$ (%)	AFCC	AFMC	FCOS	FCSM	AGKC	MIMIC
GHP	0,05855	0,05858	0,05856	16,35	0,05856	0,05857
PRE	0,08416	0,08424	0,08416	0,1152	0,08405	0,08412
AJJ	0,01619	0,0162	0,01621	39,92	0,01615	0,01617

Fonte: Autoria Própria (2020)

6.2.CENÁRIO 2 - LT 230 kV, 2 TERMINAIS E FALTA BIFÁSICA

O próximo cenário apresenta dados de tensão e corrente trifásicas para um sistema de medição com dois terminais, onde em um determinado instante de tempo, surge uma falta elétrica. A Tabela 20 apresenta as características desse sistema elétrico.

Tabela 20 - Parâmetros do Cenário 2

Parâmetros	Opções
Tipo de Medição	2 Terminais
Nível de Tensão da LT e seus parâmetros	230 kV
Tipos de Dados (com relação a sincronismo)	Sincronizados
Comprimento das LT	180 km (230 kV)
Comprimento dos circuitos equivalentes (ZTH)	20 km
Nível de tensão nos terminais (S, R e P)	$V_S = 1,02 \angle 0^\circ$ p.u. $V_R = 0,98 \angle -10^\circ$ p.u.
Método de Estimação Fasorial Base	AFCC
Falta Elétrica (com relação a sua existência)	Com Falta
Ciclo de Ocorrência da Falta (caso exista)	9º Ciclo
Tipo da Falta Elétrica	Bifásica – Fases B e C
Local Teórico da Falta Elétrica	90 km (50% da LT)
Algoritmo de Localização da Falta	GHP, PRE e AJJ

Fonte: Autoria Própria (2020)

Os parâmetros das telas “ Configurações Iniciais ” e “ Caracterização da Linha de Transmissão – 2T ” são preenchidos conforme apresentado nas Tabelas 9, 12 e 20. Escolhe-se a tensão de base como a do valor eficaz da linha de transmissão, no caso 230 kV.

Para não apresentar uma grande quantidade de resultados e tornar a leitura deste trabalho cansativa, foi escolhido estudar o comportamento de apenas alguns sinais do sistema. De antemão, todos os outros sinais também foram simulados e os resultados encontra-se como esperado na teoria. A escolha dos sinais a serem estudados deve ser feita seguindo alguns critérios.

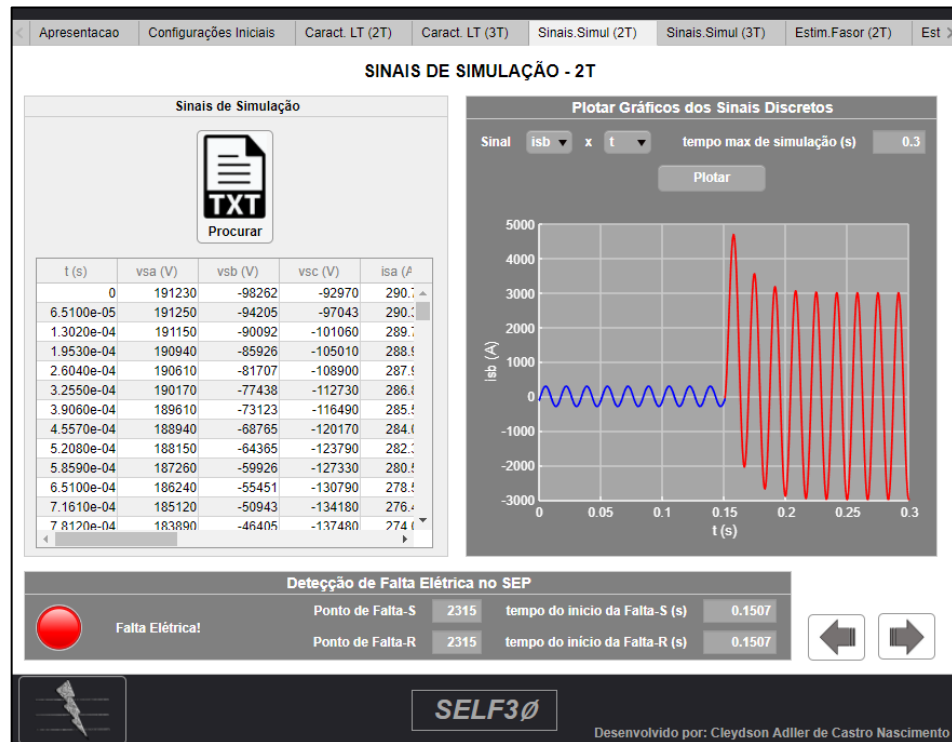
Sabe-se que o comportamento da corrente elétrica é decisivo para determinar a existência ou não de uma falta em um sistema de potência. Desse modo, como os dados amostrados repercutem uma falta bifásica entre as fases B e C do SEP, será observado para fins de resultado apenas a corrente da fase b do terminal s (*isb*). Outros resultados dos sinais podem ser observados junto ao Apêndice B.

6.2.1. Página “Sinais de Simulação – 2T”

O usuário, ao inserir o arquivo do tipo “.txt”, que contém os sinais dos medidores localizados nos terminais S e R da linha de transmissão, pode perceber que esses dados serão apresentados em forma de planilha logo após serem inseridos, como mostra a Figura 49.

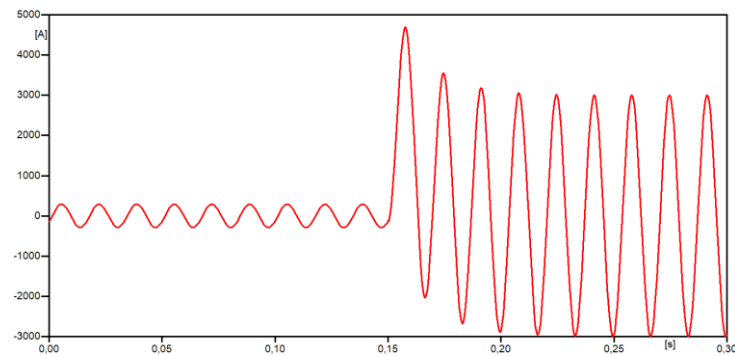
Ao clicar em “Plotar”, percebe-se que o sinal escolhido (o sinal *isb*) é apresentado no plano cartesiano do gráfico. A cor em azul evidencia o sinal no regime pré-falta e a cor vermelha, consequentemente, o regime pós-falta. Com intuito de validar a curva do sinal apresentado, faz-se a comparação com o sinal apresentado pelo *software* ATP, que se encontra exposto na Figura 50 e percebe-se que representam exatamente os mesmos dados. Foi realizado os mesmos testes para todos os outros sinais medidos no terminal S dos dados captados e verifica-se a mesma exatidão.

Figura 49 - Página "Sinais de Simulação-2T" para Cenário 2 e sinal **isb**



Fonte: Autoria Própria (2020)

Figura 50 - Sinal **isb** apresentado no software ATP



Fonte: ATP (2020)

Como a simulação retrata um sistema com perturbações, é notável no bloco “Deteção de Falta Elétrica no SEP” a lâmpada indicativa em cor vermelha e os pontos de falta e tempo do início da falta preenchidos, como mostra a Figuras 49. A Tabela 21 apresenta os valores dos pontos de falta e dos tempos do início da falta teóricos e apresentados pelo simulador.

Tabela 21 - Ponto de falta e Tempo de Falta para o Cenário 2

Deteção da Falta	Teórico	SELF3Ø - Terminal S	SELF3Ø - Terminal R
Amostra de início	2304	2315	2315
Tempo de início (s)	0,15	0,1507	0,1507

Fonte: Autoria Própria (2020)

6.2.2. Página “Estimação Fasorial -2T”

Devido a existência de uma falta elétrica no sistema de potência simulado e das características do simulador, surgem fasores de dados em regime de pré-falta e pós-falta e assim, torna-se necessário dividir esse estudo de estimação fasorial nessas duas seções. Para simular os fasores define-se a harmônica fundamental (harmônica=1) a partir do terceiro ciclo de amostras. Os fasores escolhidos são sempre definidos uma amostra após o ciclo desejado.

6.2.2.1. Fasores Pré-Falta

A Figura 51 apresenta a página de estimação do SELF3Ø com os valores calculados para um regime pré-falta. Com o objetivo de validar também a estimação fasorial da interface gráfica, esses fasores são calculados para o 3º ciclo de amostras com base no Algoritmo de Fourier de Ciclo Completo (AFCC), única técnica de estimação apresentada no *software* ATP.

Figura 51 - Página "Estimação Fasorial -2T" Pré-Falta para Cenário 2



Fonte: Autoria Própria (2020)

Para validação da estimação fasorial, compara-se os fasores calculados através do *software* ATP e do SELF3Ø, como mostra a Tabela 22, onde percebe-se que os resultados são semelhantes em módulo e divergem nos ângulos de fase. Isso acontece devido ao ATP considerar como referência angular fasorial o ângulo de 90° (representação de um fasor através de uma função seno) e o SELF3Ø faz referência a um fasor no ângulo de 0° (representação de

um fasor através de uma função cosseno) e ambos são corretos visto que a diferença é apenas questão de referencial.

A fins didáticos, a referência proposta pelo SELF3Ø agrega maior aplicabilidade nas disciplinas da engenharia elétrica (como sistemas elétricos e transmissão de energia elétrica) que modelam os circuitos trifásicos obedecendo a relação angular $[1\angle 0^\circ, 1\angle -120^\circ, 1\angle 120^\circ]$, baseada em fasores com referências do tipo cosseno.

Tabela 22 - Fasores estimados utilizando o AFCC para frequência fundamental e 3º Ciclo para o Cenário 2

Fasor Pré-Falta (3º Ciclo)	ATP (AFCC)	SELF3Ø (AFCC)
VSA	$1,913 \cdot 10^5 \angle 90,4333^\circ$	$1,913 \cdot 10^5 \angle 0,4333^\circ$
VSB	$1,913 \cdot 10^5 \angle -29,57^\circ$	$1,913 \cdot 10^5 \angle -119,6^\circ$
VSC	$1,913 \cdot 10^5 \angle -149,6^\circ$	$1,913 \cdot 10^5 \angle 120,4^\circ$
ISA	$291,1 \angle 94,2^\circ$	$291,1 \angle 4,202^\circ$
ISB	$291,2 \angle -25,8^\circ$	$291,2 \angle -115,8^\circ$
ISC	$291,1 \angle -145,8^\circ$	$291,1 \angle 124,2^\circ$
VRA	$1,851 \cdot 10^5 \angle 82,26^\circ$	$1,851 \cdot 10^5 \angle -7,737^\circ$
VRB	$1,851 \cdot 10^5 \angle -37,74^\circ$	$1,851 \cdot 10^5 \angle -127,7^\circ$
VRC	$1,851 \cdot 10^5 \angle -157,7^\circ$	$1,851 \cdot 10^5 \angle 112,3^\circ$
IRA	$296,5 \angle -107^\circ$	$296,5 \angle 163^\circ$
IRB	$296,5 \angle 133^\circ$	$296,5 \angle 42,97^\circ$
IRC	$296,5 \angle 12,97^\circ$	$296,5 \angle -77,03^\circ$

Fonte: Autoria Própria (2020)

Foi realizado os mesmos testes para todos os outros métodos de estimação fasorial disponíveis no simulador SELF3Ø (AFMC, FCOS, FCSM, AGKC e MIMIC) e os valores obedecem ao esperado em teoria, normalmente com variações nos ângulos dos fasores, em virtude das características inerentes dos filtros aplicados em cada técnica de estimação. A Tabela AP1 do Apêndice B apresenta os resultados para cada método de estimação adicional.

Os dados simulados nesse cenário são, teoricamente, sincronizados e não necessitam de algoritmo para sincronismo. O Algoritmo de Sincronização, por sua vez, encontrou pequenos ângulos de sincronização para cada algoritmo de localização utilizado, como apresentado na Tabela 23.

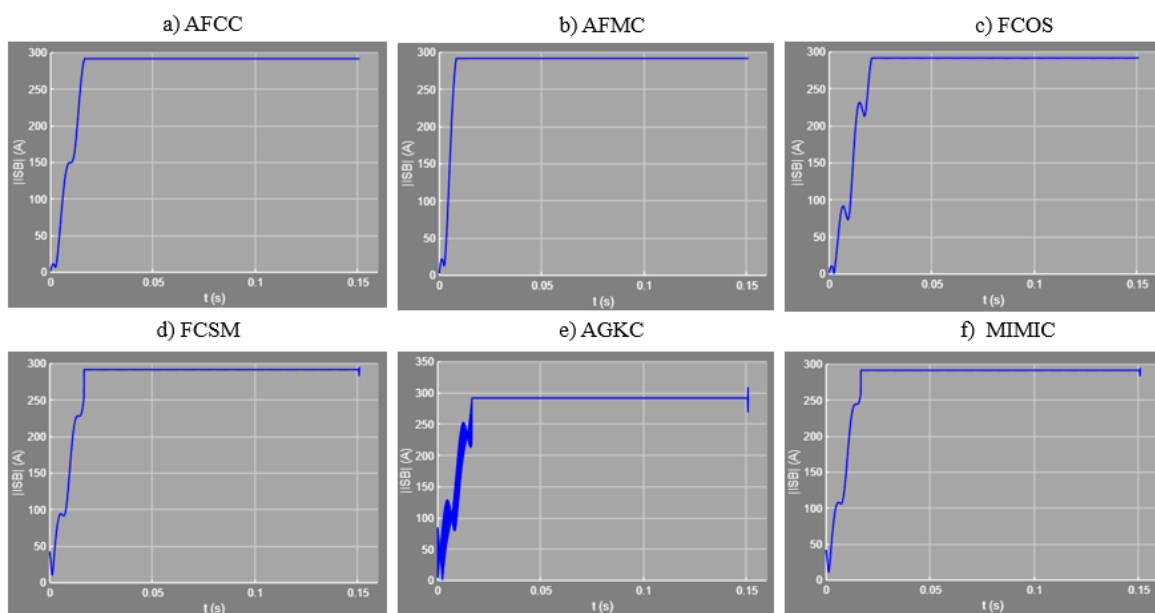
Tabela 23 - Ângulos de sincronização para o Cenário 2

Sincronização	Teórico	AFCC	AFMC	FCOS	FCSM	AGKC	MIMIC
$\delta \text{ (rad)}$	0	-0,00728	-0,00724	-0,00729	-2,333	-0,00639	-0,00729

Fonte: Autoria Própria (2020)

A Figura 52 apresenta o comportamento do janelamento para o fasor ISB considerando os métodos de estimação disponíveis junto ao SELF3Ø, de forma que esse gráfico pode ser utilizado para analisar os fasores de pré-falta. Os valores dos índices de despenho (ID_1 , ID_2 e ID_3) para a curva que representa a estimação pré-falta para o fasor ISB é apresentado na Tabela AP2 do Apêndice B.

Figura 52 - Curva do janelamento de dados para estimação fasorial da corrente ISB pré-falta no Cenário 2



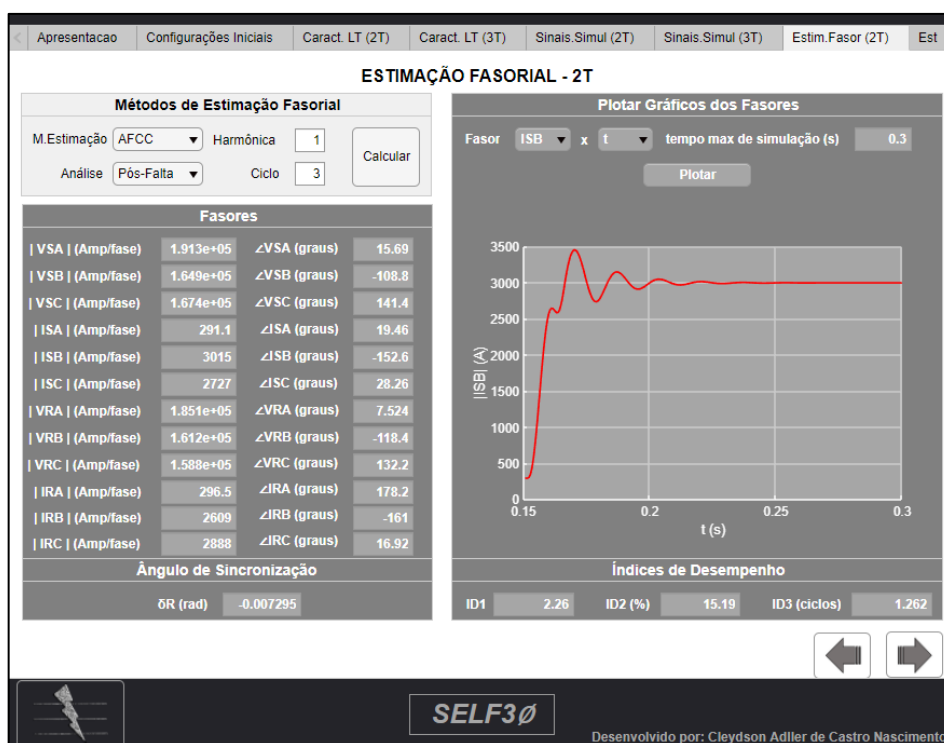
Fonte: Autoria Própria (2020)

6.2.2.2. Fasores Pós-Falta

Com o propósito de se obter também os fasores pós-falta dessa simulação, modifica-se o item “Análise” para “Pós-Falta” junto a página “Estimação Fasorial -2T”. A Figura 53 apresenta a página de estimação do SELF3Ø com os valores calculados para um regime pós-falta.

Com o objetivo de validar também a estimação fasorial da interface gráfica, esses fasores são calculados para o 3º Ciclo de amostras com base no Algoritmo de Fourier de Ciclo Completo (AFCC), única técnica de estimação apresentada no *software* ATP. Os resultados para comparação são expostos junto a Tabela 24.

Figura 53 - Página "Estimação Fasorial -2T" Pós-Falta para Cenário 2



Fonte: Autoria Própria (2020)

Tabela 24 – Fasores pós-falta estimados para frequência fundamental e 3º Ciclo junto ao Cenário 2

Fasor Pós-Falta (3º Ciclo)	ATP (AFCC)	SELF3Ø (AFCC)
VSA	$1,913 \cdot 10^5 \angle 90,23^\circ$	$1,913 \cdot 10^5 \angle 15,69^\circ$
VSB	$1,649 \cdot 10^5 \angle -34,3^\circ$	$1,649 \cdot 10^5 \angle -108,8^\circ$
VSC	$1,674 \cdot 10^5 \angle -144^\circ$	$1,674 \cdot 10^5 \angle 141,4^\circ$
ISA	$291,1 \angle 93,99^\circ$	$291,1 \angle 19,46^\circ$
ISB	$2999 \angle -77,95^\circ$	$3015 \angle -152,6^\circ$
ISC	$2711 \angle 102,9^\circ$	$2727 \angle 28,26^\circ$
VRA	$1,851 \cdot 10^5 \angle 82,06^\circ$	$1,851 \cdot 10^5 \angle 7,524^\circ$
VRB	$1,612 \cdot 10^5 \angle -43,89^\circ$	$1,612 \cdot 10^5 \angle -118,4^\circ$
VRC	$1,588 \cdot 10^5 \angle -153,2^\circ$	$1,588 \cdot 10^5 \angle 132,2^\circ$
IRA	$296,5 \angle -107,2^\circ$	$296,5 \angle 178,2^\circ$
IRB	$2592 \angle -86,4^\circ$	$2609 \angle -161^\circ$
IRC	$2871 \angle 91,5^\circ$	$2888 \angle 16,92^\circ$

Fonte: Autoria Própria (2020)

De acordo com a Tabela 24 existe diferença de resultados entre os fasores, tanto com relação aos módulos, como também a respeito dos ângulos de fase, comparando os resultados obtidos junto ao ATP e SELF3Ø. Essa diferença de resultados pode ser entendida basicamente devido aos fasores estimados junto ao ATP fazerem uso de amostras a partir do valor teórico

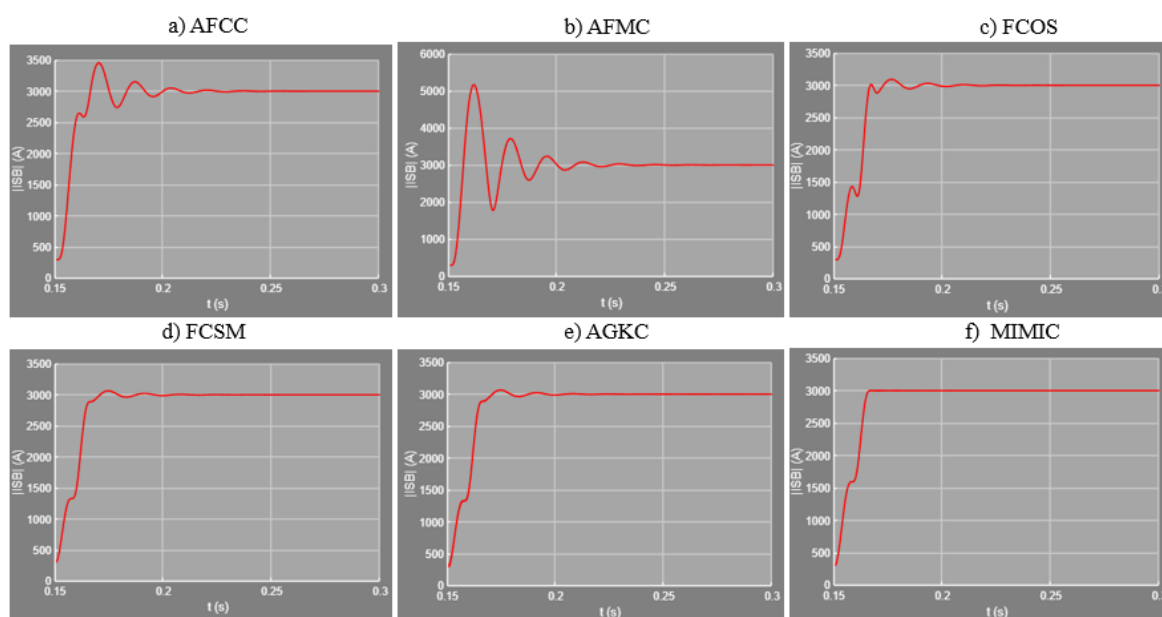
da falta (0,15 s) e os fasores calculados juntos ao SELF3Ø utilizarem de um algoritmo de localização de ponto de falta (detectando 0,1507 s).

Esse contraste do ponto de início de falta proporciona um deslocamento na janela de dados (de onze amostras, nesse cenário), projetando assim uma assim essa diferença entre os fasores estimados. Vale salientar que os fasores estimados através dos dois *softwares* apresentam resultados próximos e aceitáveis, porém, dados apresentados junto ao SELF3Ø garantem uma análise apenas com dados pós-falta dos terminais medidores, característica essa essencial para aplicação nos algoritmos de localização de faltas.

Foi realizado os mesmos testes para todos os outros métodos de estimação fasorial disponíveis no simulador SELF3Ø (AFMC, FCOS, FCSM, AGKC e MIMIC) e os resultados de estimação foram obtidos, normalmente com variações nos ângulos dos fasores, em virtude das características inerentes dos filtros aplicados em cada técnica de estimação. A Tabela AP3 do Apêndice B apresenta os resultados para cada método de estimação adicional.

A Figura 54 apresenta o comportamento do janelamento para o fasor *ISB* considerando os métodos de estimação disponíveis junto ao SELF3Ø, de forma que esse gráfico pode ser utilizado para analisar os fasores de pós-falta. Os valores dos índices de despenho (ID_1 , ID_2 e ID_3) para a curva que representa a estimação pós-falta para o fasor ISB é apresentado na Tabela AP4 do Apêndice B.

Figura 54 - Curva do janelamento de dados para estimação fasorial da corrente ISB pós-falta no Cenário 2

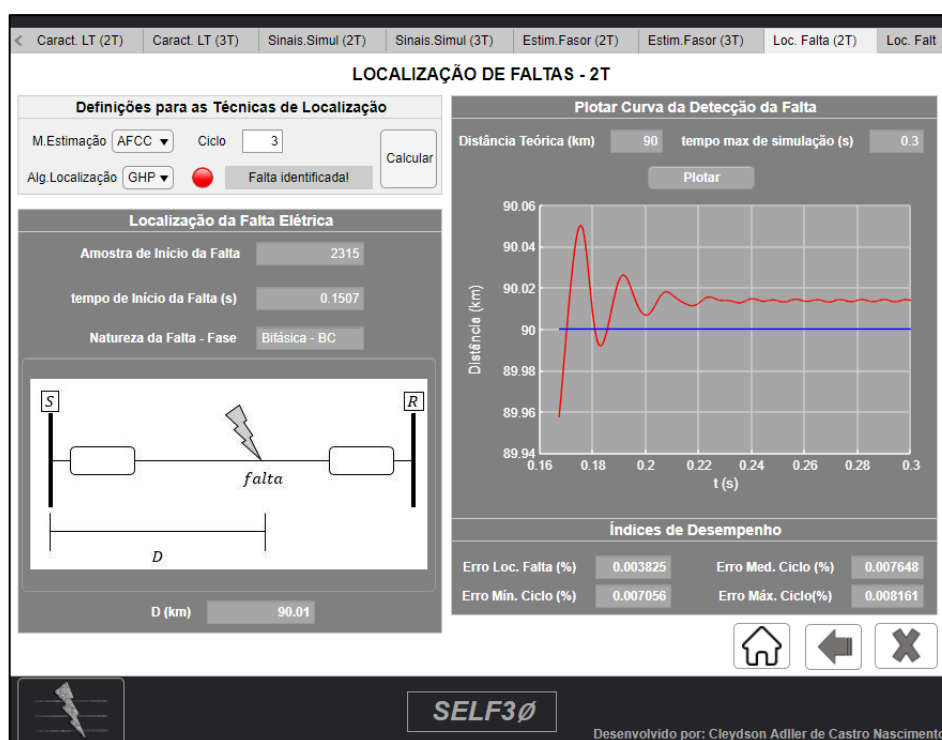


Fonte: Autoria Própria (2020)

6.2.3. Página “Localização de Faltas -2T”

A tela “Localização de Faltas -2T”, apresentada na Figura 55, mostra em seus resultados a amostra do início, o tempo inicial e a natureza da falta. Além disso, apresenta na caixa inferior a distância (D) em km para qualquer algoritmo de localização escolhido.

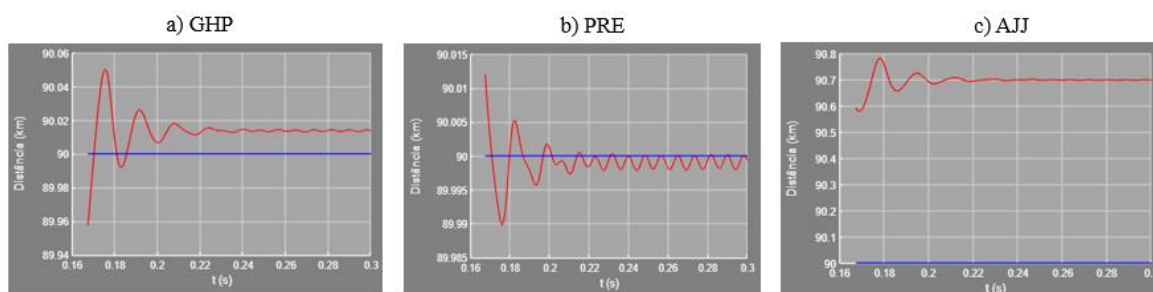
Figura 55 - Página "Localização de Faltas - 2T" relativo ao Cenário 2



Fonte: Autoria Própria (2020)

A Figura 56, por sua vez, apresenta o comportamento gráfico para convergência dos algoritmos de localização de faltas. Percebe-se nesse caso que, os algoritmos de GHP e PRE são mais precisos, algo que era esperado quando a falta ocorre a 50% de uma LT.

Figura 56 - Comportamento Gráfico da localização de falta para o Cenário 2



Fonte: Autoria Própria (2020)

A Tabela 25 apresenta os valores calculados utilizando o AFCC (estimado para o 3º Ciclo) como estimador de fasores e para os diversos métodos de localização de falta contidos

no simulador. Os resultados para localização usando outros algoritmos de estimação estão localizados na Tabelas AP5 do Apêndice B.

Tabela 25 - Localização da Falta para o Cenário 2

Localização da Falta D	Teórico	GHP	PRE	AJJ
AFCC – 3º Ciclo	90 km	90,01 km	89,99 km	90,69 km

Fonte: Autoria Própria (2020)

Devido à complexidade para apresentar todos os índices de desempenho de localização, visto que eles podem ser modificados em virtude do método de estimação, do algoritmo de localização de faltas ou da combinação entre eles, escolhe-se apresentar apenas o erro médio por ciclo ($\overline{\varepsilon_{ciclo}}$), através da Tabela 26.

Tabela 26 - Erro Médio por Ciclo para o Cenário 2

$\overline{\varepsilon_{ciclo}}$ (%)	AFCC	AFMC	FCOS	FCSM	AGKC	MIMIC
GHP	0,007648	0,00765	0,007645	3,613	0,00764	0,007654
PRE	0,000583	0,000584	0,000711	0,000489	0,003907	0,000597
AJJ	0,3894	0,3898	0,3895	12,09	0,3896	0,3896

Fonte: Autoria Própria (2020)

6.3. CENÁRIO 3 - LT 500 kV, 2 TERMINAIS E FALTA TRIFÁSICA

O próximo cenário apresenta dados de tensão e corrente trifásicas para um sistema de medição com dois terminais em uma LT de 500 kV, onde em um determinado instante de tempo, surge uma falta elétrica. A Tabela 27 apresenta as características desse sistema elétrico.

Tabela 27 - Parâmetros do Cenário 3

Parâmetros	Opções
Tipo de Medição	2 Terminais
Nível de Tensão da LT e seus parâmetros	500 kV
Tipos de Dados (com relação a sincronismo)	Sincronizados
Comprimento das LT	250 km (500 kV)
Comprimento dos circuitos equivalentes (ZTH)	20 km
Nível de tensão nos terminais (S, R e P)	$V_S = 1,01 \angle 0^\circ$ p.u $V_R = 0,99 \angle -10^\circ$ p.u
Método de Estimação Fasorial Base	AFCC
Falta Elétrica (com relação a sua existência)	Com Falta
Ciclo de Ocorrência da Falta (caso exista)	6º Ciclo
Tipo da Falta Elétrica	Trifásica – Fases ABC
Local Teórico da Falta Elétrica	62,5 km (25% da LT)
Algoritmo de Localização da Falta	GHP, PRE e AJJ

Fonte: Autoria Própria (2020)

Os parâmetros das telas “ Configurações Iniciais ” e “ Caracterização da Linha de Transmissão – 2T ” são preenchidos conforme apresentado nas Tabelas 10, 12 e 27. Escolhe-se a tensão de base como a do valor eficaz da linha de transmissão, no caso 500 kV.

Sabe-se que a corrente elétrica é um sinal flagrante para descrever a existência ou não de uma falta em um sistema de potência. Desse modo, como os dados amostrados repercutem uma falta trifásica entre as fases A, B e C do SEP, será observado para fins de resultado apenas a corrente da fase c do terminal s (i_{sc}). Outros resultados dos sinais podem ser observados junto ao Apêndice C.

6.3.1. Página “Sinais de Simulação – 2T”

O usuário, ao inserir o arquivo do tipo “.txt”, que contém os sinais dos medidores localizados nos terminais S e R da linha de transmissão, pode perceber que esses dados serão apresentados em forma de planilha logo após serem inseridos, como mostra a Figura 57.

Ao clicar em “Plotar”, percebe-se que o sinal escolhido (o sinal i_{sc}) é apresentado no plano cartesiano do gráfico. A cor em azul evidencia o sinal no regime pré-falta e a cor vermelha, consequentemente, o regime pós-falta. Com intuito de validar a curva do sinal apresentado, faz-se a comparação com o sinal apresentado pelo *software* ATP, que se encontra exposto na Figura 58 e percebe-se que representam exatamente os mesmos dados.

Figura 57 - Página "Sinais de Simulação-2T" para Cenário 3 e sinal i_{sc}

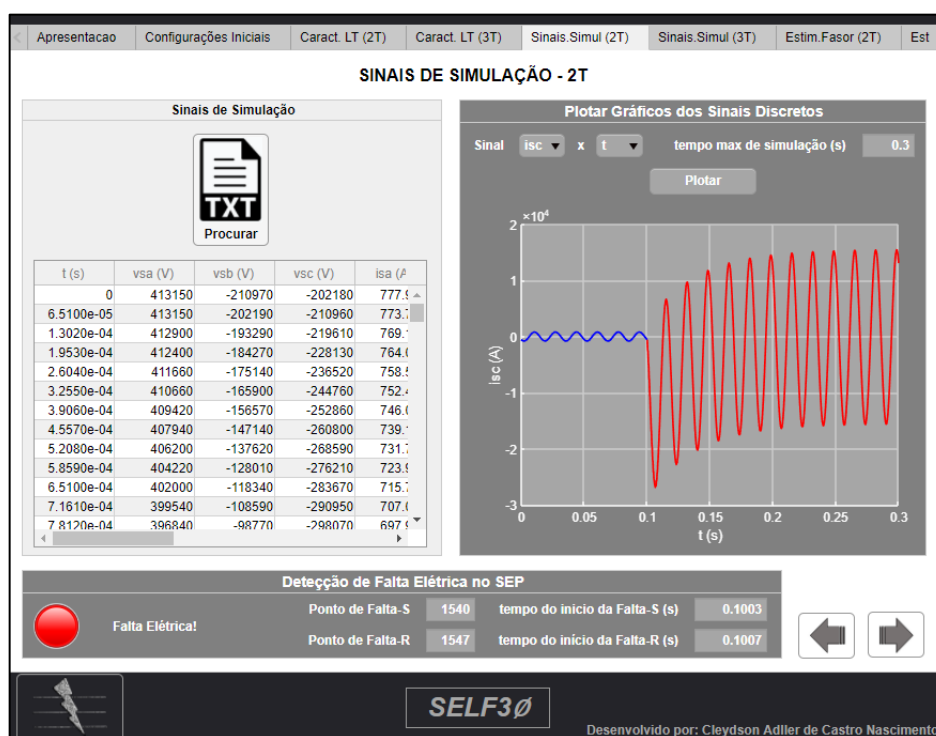
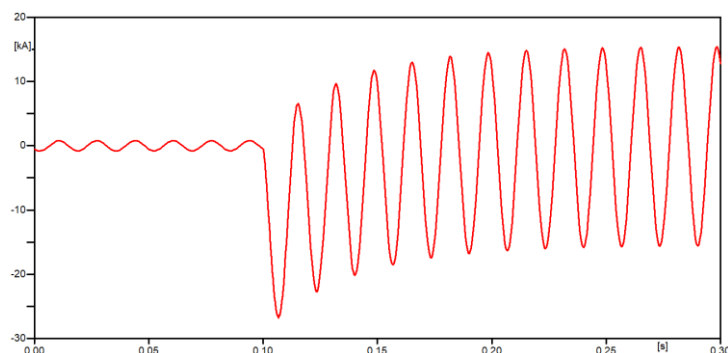


Figura 58 - Sinal i_{sc} apresentado no software ATP para o Cenário 3

Fonte: ATP (2020)

Como a simulação retrata um sistema com perturbações, é notável no bloco “Detecção de Falta Elétrica no SEP” a lâmpada indicativa em cor vermelha e os pontos de falta e tempo do início da falta preenchidos, como mostra a Figura 57. A Tabela 28 apresenta os valores dos pontos de falta e dos tempos do início da falta teóricos e apresentados pelo simulador.

Tabela 28 - Ponto de falta e Tempo de Falta para o Cenário 3

Detecção da Falta	Teórico	SELF3Ø - Terminal S	SELF3Ø - Terminal R
Amostra de início	1536	1540	1547
Tempo de início (s)	0,1	0,1003	0,1007

Fonte: Autoria Própria (2020)

6.3.2. Página “Estimação Fasorial -2T”

Devido a existência de uma falta elétrica no sistema de potência simulado e das características do simulador, surgem fasores de dados em regime de pré-falta e pós-falta e assim, torna-se necessário dividir esse estudo de estimação fasorial em duas partes. Para simular os fasores define-se a harmônica fundamental (harmônica=1) a partir do terceiro ciclo de amostras. Os fasores escolhidos são sempre definidos uma amostra após o ciclo desejado.

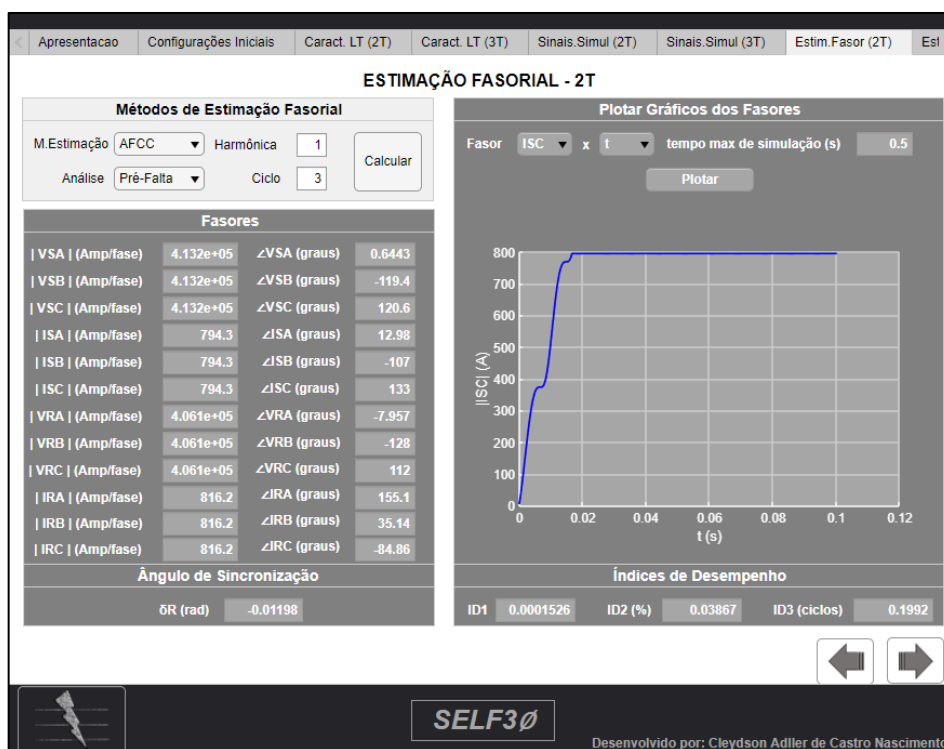
6.3.2.1. Fasores Pré-Falta

A Figura 59 apresenta a página de estimação do SELF3Ø com os valores calculados para um regime pré-falta. Com o objetivo de validar também a estimação fasorial da interface gráfica, esses fasores são calculados para o 3º ciclo de amostras com base no Algoritmo de Fourier de Ciclo Completo (AFCC), única técnica de estimação apresentada no *software* ATP.

Para validação da estimação fasorial, compara-se os fasores calculados através do *software* ATP e do SELF3Ø, como mostra a Tabela 29, onde percebe-se que os resultados são semelhantes em módulo e divergem nos ângulos de fase. Isso acontece devido ao ATP considerar como referência angular fasorial o ângulo de 90° (representação de um fasor através

de uma função seno) e o SELF3Ø faz referência a um fasor no ângulo de 0° (representação de um fasor através de uma função cosseno) e ambos são corretos visto que a diferença é apenas questão de referencial.

Figura 59 - Página "Estimação Fasorial -2T" Pré-Falta para Cenário 3



Fonte: Autoria Própria (2020)

Tabela 29 - Fasores estimados utilizando o AFCC para frequência fundamental e 3º Ciclo para o Cenário 3

Fasor Pré-Falta (3º Ciclo)	ATP (AFCC)	SELF3Ø (AFCC)
VSA	$4,132 \cdot 10^5 \angle 90,64^\circ$	$4,132 \cdot 10^5 \angle 0,6443^\circ$
VSB	$4,132 \cdot 10^5 \angle -29,35^\circ$	$4,132 \cdot 10^5 \angle -119,4^\circ$
VSC	$4,132 \cdot 10^5 \angle -149,4^\circ$	$4,132 \cdot 10^5 \angle 120,6^\circ$
ISA	$794,3 \angle 103^\circ$	$794,3 \angle 12,98^\circ$
ISB	$794,3 \angle -17,02^\circ$	$794,3 \angle -107^\circ$
ISC	$794,3 \angle -137^\circ$	$794,3 \angle 133^\circ$
VRA	$4,061 \cdot 10^5 \angle 82,04^\circ$	$4,061 \cdot 10^5 \angle -7,957^\circ$
VRB	$4,061 \cdot 10^5 \angle -37,95^\circ$	$4,061 \cdot 10^5 \angle -128^\circ$
VRC	$4,061 \cdot 10^5 \angle -158^\circ$	$4,061 \cdot 10^5 \angle 112^\circ$
IRA	$816,2 \angle -114,9^\circ$	$816,2 \angle 155,1^\circ$
IRB	$816,2 \angle 125,1^\circ$	$816,2 \angle 35,14^\circ$
IRC	$816,2 \angle 5,138^\circ$	$816,2 \angle -84,86^\circ$

Fonte: Autoria Própria (2020)

A fins didáticos, a referência proposta pelo SELF3Ø agrega maior aplicabilidade nas disciplinas da engenharia elétrica que modelam os circuitos trifásicos obedecendo a relação angular $[1\angle 0^\circ \ 1\angle -120^\circ \ 1\angle 120^\circ]$, baseada em fasores com referências do tipo cosseno.

Foi realizado os mesmos testes para todos os outros métodos de estimação fasorial disponíveis no simulador SELF3Ø (AFMC, FCOS, FCSM, AGKC e MIMIC) apresentando, normalmente variações nos ângulos dos fasores, em virtude das características inerentes dos filtros aplicados em cada técnica de estimação. A Tabela AP1 do Apêndice C apresenta os resultados para cada método de estimação adicional.

Os dados simulados nesse cenário são, teoricamente, sincronizados e não necessitam de algoritmo para sincronismo. Algoritmo de Sincronização, por sua vez, encontrou pequenos ângulos de sincronização para cada algoritmo de localização utilizado, como apresentado na Tabela 30.

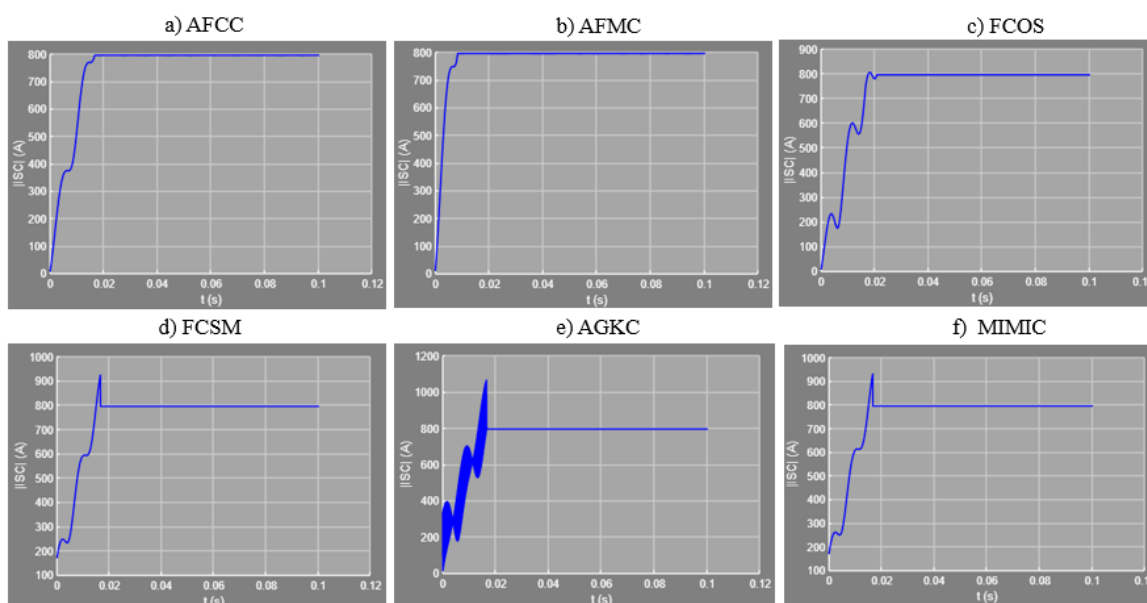
Tabela 30 - Ângulos de sincronização para o Cenário 3

Sincronização	Teórico	AFCC	AFMC	FCOS	FCSM	AGKC	MIMIC
$\delta \text{ (rad)}$	0	-0,01198	-0,01196	-0,01198	-0,0353	-0,01162	-0,01199

Fonte: Autoria Própria (2020)

A Figura 60 apresenta o comportamento do janelamento para o fasor ISC considerando os métodos de estimação disponíveis no SELF3Ø, onde o gráfico pode ser utilizado para analisar os fasores de pré-falta. Os índices de despenho para a curva que representa a estimação pré-falta para o fasor ISC é apresentado na Tabela AP2 do Apêndice C.

Figura 60 - Curva do janelamento de dados para estimação fasorial da corrente ISC pré-falta no Cenário 3



Fonte: Autoria Própria (2020)

6.3.2.2. Fasores Pós-Falta

A Figura 61 apresenta a página de estimação do SELF3Ø com os valores calculados para um regime pós-falta, comparando-se o 3º ciclo de amostras com base no Algoritmo de Fourier de Ciclo Completo.

Figura 61 - Página "Estimação Fasorial -2T" Pós-Falta para Cenário 3



Fonte: Autoria Própria (2020)

A Tabela 31, por sua vez, apresenta esses fasores estimados através dos dois *softwares*, mostrando a diferença de resultados entre os fasores, tanto com relação aos módulos, como também a respeito dos ângulos de fase, comparando os resultados obtidos junto ao ATP e SELF3Ø. Essa diferença de resultados pode ser entendida basicamente devido aos fasores estimados junto ao ATP fazerem uso de amostras a partir do valor teórico da falta (0,1 s) e os fasores calculados juntos ao SELF3Ø utilizarem de um algoritmo de localização de ponto de falta (detectando 0,1007 s).

Esse contraste do ponto de início de falta proporciona um deslocamento na janela de dados (de cinco amostras, nesse cenário), projetando assim uma assim essa diferença entre os fasores estimados. Vale salientar que os fasores estimados através dos dois *softwares* apresentam resultados próximos e aceitáveis, porém, dados apresentados junto ao SELF3Ø garantem uma análise apenas com dados pós-falta dos terminais medidores, característica essa essencial para aplicação nos algoritmos de localização de faltas.

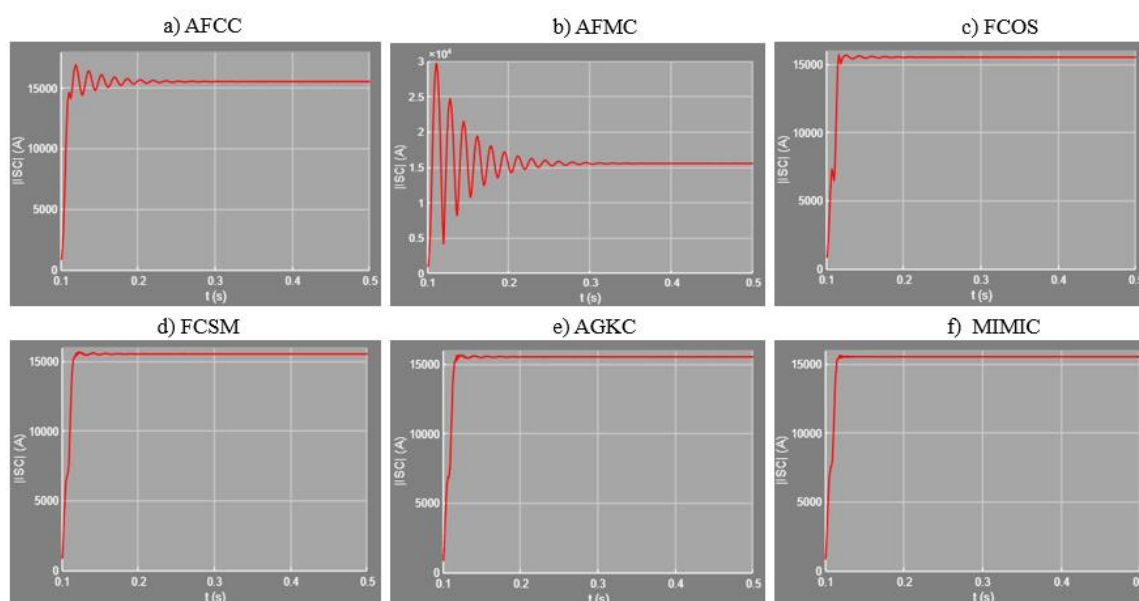
Tabela 31 - Fasores estimados utilizando o AFCC para frequência fundamental e 3º Ciclo para o Cenário 3

Fasor Pós-Falta (3º Ciclo)	ATP (AFCC)	SELF3Ø (AFCC)
VSA	$3,127 \cdot 10^5 \angle 91,21^\circ$	$3,126 \cdot 10^5 \angle 16,67^\circ$
VSB	$3,126 \cdot 10^5 \angle -28,8^\circ$	$3,126 \cdot 10^5 \angle -103,3^\circ$
VSC	$3,126 \cdot 10^5 \angle -148,8^\circ$	$3,126 \cdot 10^5 \angle 136,7^\circ$
ISA	$1.548 \cdot 10^4 \angle 5,165^\circ$	$1.548 \cdot 10^4 \angle -69,35^\circ$
ISB	$1.519 \cdot 10^4 \angle -112,7^\circ$	$1.536 \cdot 10^4 \angle 172,9^\circ$
ISC	$1.583 \cdot 10^4 \angle 127,1^\circ$	$1.595 \cdot 10^4 \angle 52,16^\circ$
VRA	$3,667 \cdot 10^5 \angle 81,23^\circ$	$3,653 \cdot 10^5 \angle 6,677^\circ$
VRB	$3,662 \cdot 10^5 \angle -38,83^\circ$	$3,659 \cdot 10^5 \angle -113,3^\circ$
VRC	$3,661 \cdot 10^5 \angle -158,7^\circ$	$3,658 \cdot 10^5 \angle 126,6^\circ$
IRA	$5937 \angle -4,878^\circ$	$5939 \angle -79,27^\circ$
IRB	$5782 \angle -122,8^\circ$	$5852 \angle 162,9^\circ$
IRC	$6040 \angle 117,4^\circ$	$6092 \angle 42,54^\circ$

Fonte: Autoria Própria (2020)

Foi realizado testes para todos os outros métodos de estimação fasorial disponíveis no simulador SELF3Ø e os resultados de estimação foram obtidos, normalmente com variações nos ângulos dos fasores, em virtude das características inerentes de cada técnica de estimação. A Tabela AP3 do Apêndice C apresenta os resultados para cada método de estimação adicional.

A Figura 62 apresenta o comportamento do janelamento para o fasor *ISC* considerando os métodos de estimação disponíveis junto ao SELF3Ø. Os valores dos índices de despenho para a curva pós-falta para o fasor *ISC* é apresentado na Tabela AP4 do Apêndice C.

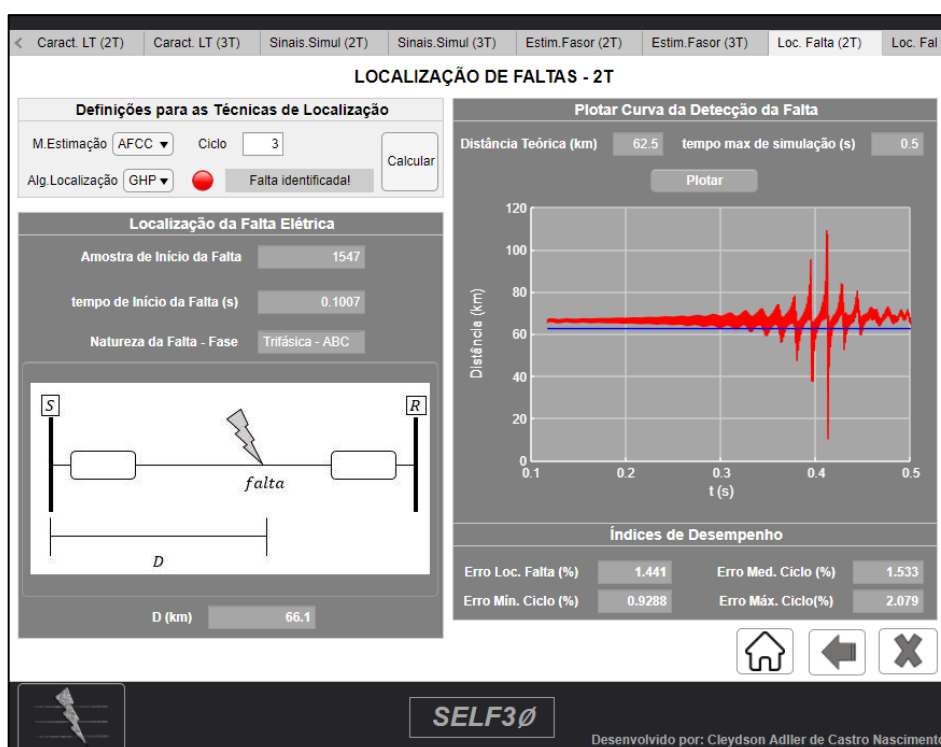
Figura 62 - Curva do janelamento de dados para estimação fasorial da corrente *ISC* pós-falta no Cenário 3

Fonte: Autoria Própria (2020)

6.3.3. Página “Localização de Faltas -2T”

A tela “Localização de Faltas -2T”, apresentada na Figura 63, mostra em seus resultados a amostra do início, o tempo inicial e a natureza da falta. Além disso, apresenta na caixa inferior a distância (D) em km para qualquer algoritmo de localização escolhido.

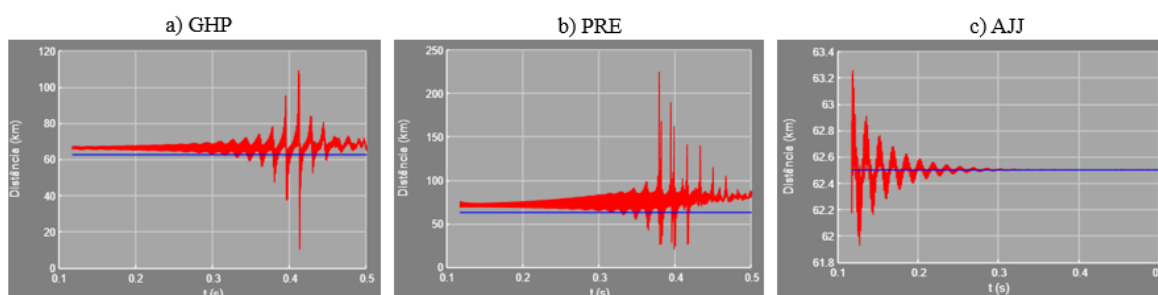
Figura 63 - Página "Localização de Faltas - 2T" relativo ao Cenário 3



Fonte: Autoria Própria (2020)

A Figura 64, por sua vez, apresenta o comportamento gráfico para convergência dos algoritmos de localização de faltas. Percebe-se nesse caso que, o algoritmo de JJ utilizando o AFCC é o mais preciso e converge para o valor teórico.

Figura 64 - Comportamento Gráfico da localização de falta para o Cenário 3



Fonte: Autoria Própria (2020)

A Tabela 32 apresenta os valores calculados utilizando o AFCC (estimado para o 3º Ciclo) como estimador de fasores e para os diversos métodos de localização de falta contidos

no simulador. Os resultados para localização usando outros algoritmos de estimação estão localizados na Tabelas AP5 do Apêndice C.

Tabela 32 - Localização da Falta para o Cenário 3

Localização da Falta D	Teórico	GHP	PRE	AJJ
AFCC – 3º Ciclo	62,5 km	66,1 km	72,52 km	62,75 km

Fonte: Autoria Própria (2020)

Devido à complexidade para apresentar todos os índices de desempenho de localização, visto que eles podem ser modificados em virtude do método de estimação, do algoritmo de localização de faltas ou da combinação entre eles, escolhe-se apresentar apenas o erro médio por ciclo ($\overline{\varepsilon_{ciclo}}$), através da Tabela 33.

Tabela 33 - Erro Médio por Ciclo para o Cenário 3

$\overline{\varepsilon_{ciclo}}$ (%)	AFCC	AFMC	FCOS	FCSM	AGKC	MIMIC
GHP	1,533	1,532	5,294	123,1	77,88	82,62
PRE	3,622	3,495	3,788	8,249	6,634	7,243
AJJ	0,01779	0,1362	0,01448	4,343	0,1452	0,1432

Fonte: Autoria Própria (2020)

6.4. CENÁRIO 4 - LT 138 kV, 3 TERMINAIS E CURTO MONOFÁSICO

O próximo cenário apresenta dados de tensão e corrente trifásicas para um sistema de medição com três terminais, onde em um determinado instante de tempo, surge uma falta elétrica. A Tabela 34 apresenta as características desse sistema elétrico.

Tabela 34 - Parâmetros do Cenário 4

Parâmetros	Opções
Tipo de Medição	3 Terminais
Nível de Tensão da LT e seus parâmetros	138 kV
Tipos de Dados (com relação a sincronismo)	Sincronizados
Comprimento das LTs	$LS = LR = LP = 90\text{km}$
Comprimento dos circuitos equivalentes (ZTH)	20 km
Nível de tensão nos terminais (S, R e P)	$V_S = 1,02 \angle 0^\circ \text{ p.u}$ $V_R = 0,98 \angle -10^\circ \text{ p.u}$ $V_P = 0,99 \angle 10^\circ \text{ p.u}$
Método de Estimação Fasorial Base	AFCC
Falta Elétrica (com relação a sua existência)	Com Falta
Ciclo de Ocorrência da Falta (caso exista)	15º Ciclo
Tipo da Falta Elétrica	Monofásica – Fases C
Local Teórico da Falta Elétrica	157,5 km (entre S e P)
Algoritmo de Localização da Falta	GHP

Fonte: Autoria Própria (2020)

Os parâmetros das telas “ Configurações Iniciais ” e “ Caracterização da Linha de Transmissão – 3T ” são preenchidos conforme apresentado nas Tabelas 8, 12 e 34. Escolhe-se a tensão de base como a do valor eficaz da linha de transmissão, no caso 138 kV.

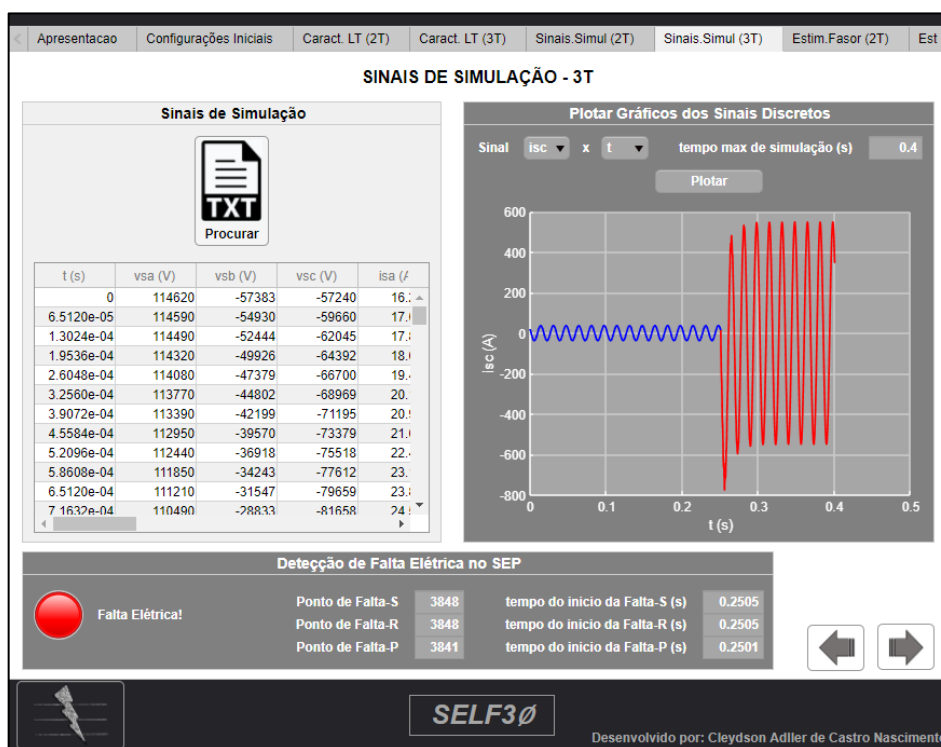
Sabe-se que a corrente elétrica é um sinal flagrante para descrever a existência ou não de uma falta em um sistema de potência. Desse modo, como os dados amostrados repercutem uma falta monofásica na fase C do SEP, será observado para fins de resultado apenas a corrente da fase c do terminal s (i_{sc}). Outros resultados dos sinais estão contidos no Apêndice D.

6.4.1. Página “Sinais de Simulação – 3T”

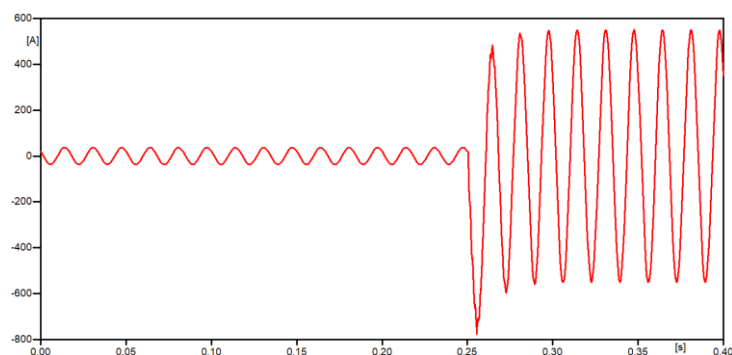
O usuário, ao inserir o arquivo do tipo “.txt”, que contém os sinais dos medidores localizados nos terminais S, R e P da linha de transmissão, pode perceber que esses dados serão apresentados em forma de planilha logo após serem inseridos, como mostra a Figura 65.

Ao clicar em “Plotar”, percebe-se que o sinal escolhido (o sinal i_{sc}) é apresentado no plano cartesiano do gráfico. A cor em azul evidencia o sinal no regime pré-falta e a cor vermelha, consequentemente, o regime pós-falta. Com intuito de validar a curva do sinal apresentado, faz-se a comparação com o sinal apresentado pelo *software* ATP, que se encontra exposto na Figura 66 e percebe-se que representam exatamente os mesmos dados.

Figura 65 - Página "Sinais de Simulação-3T" para Cenário 4 e sinal i_{sc}



Fonte: Autoria Própria (2020)

Figura 66 - Sinal i_{sc} apresentado no software ATP para o Cenário 4

Fonte: ATP (2020)

Como a simulação retrata um sistema com perturbações, nota-se no bloco “Detecção de Falta Elétrica no SEP” a lâmpada indicativa em cor vermelha e os pontos de falta e tempo do início da falta preenchidos, como mostra a Figura 65. A Tabela 35 apresenta os valores dos pontos de falta e dos tempos do início da falta teóricos e apresentados pelo simulador.

Tabela 35 - Ponto de falta e Tempo de Falta para o Cenário 4

Detecção da Falta	Teórico	SELF3Ø Terminal S	SELF3Ø Terminal R	SELF3Ø Terminal P
Amostra de início	3840	3848	3848	3841
Tempo de início (s)	0,25	0,2505	0,2505	0,2501

Fonte: Autoria Própria (2020)

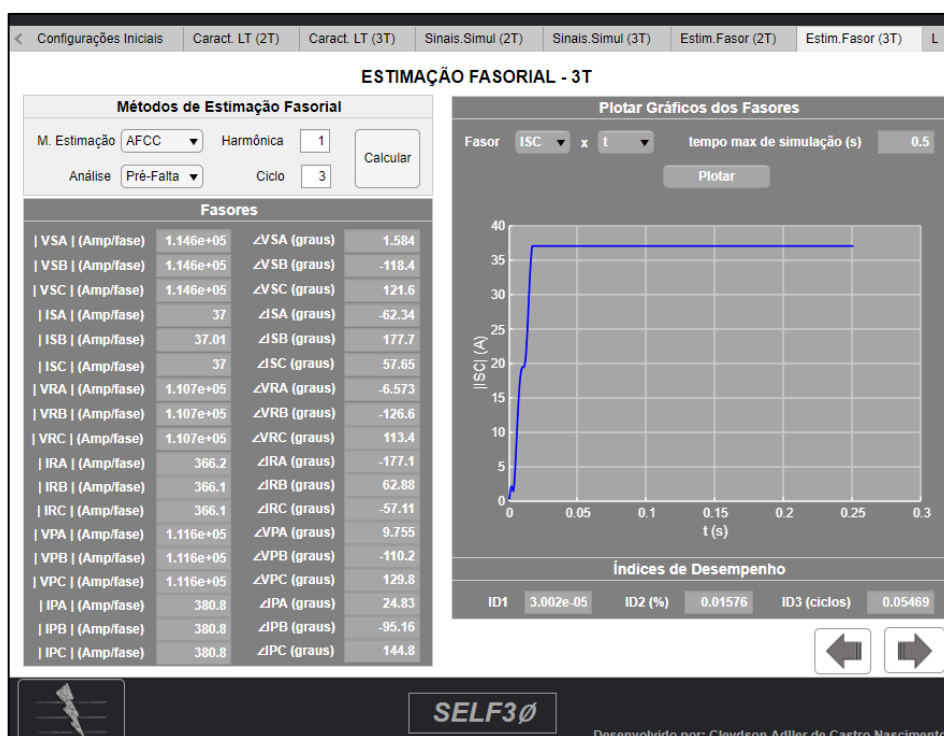
6.4.2. Página “Estimação Fasorial -3T”

Devido a existência de uma falta elétrica no sistema de potência simulado e das características do simulador, surgem fasores de dados em regime de pré-falta e pós-falta e assim, torna-se necessário dividir esse estudo de estimação fasorial em duas seções. Para simular os fasores define-se a harmônica fundamental (harmônica=1) a partir do terceiro ciclo de amostras. Os fasores escolhidos são sempre definidos uma amostra após o ciclo desejado.

6.4.2.1. Fasores Pré-Falta

A Figura 67 apresenta a página de estimação do SELF3Ø com os valores calculados para um regime pré-falta. Com o objetivo de validar também a estimação fasorial da interface gráfica, esses fasores são calculados para o 3º ciclo de amostras com base no Algoritmo de Fourier de Ciclo Completo (AFCC), única técnica de estimação apresentada no *software* ATP.

Figura 67 - Página "Estimação Fasorial -3T" Pré-Falta para Cenário 4



Fonte: Autoria Própria (2020)

Para validação da estimação fasorial, compara-se os fasores calculados através do *software* ATP e do SELF3Ø, como mostra a Tabela 36, onde percebe-se que os resultados são semelhantes em módulo e divergem nos ângulos de fase. Isso acontece devido ao ATP considerar como referência angular fasorial o ângulo de 90° (representação de um fasor através de uma função seno) e o SELF3Ø faz referência a um fasor no ângulo de 0° (representação de um fasor através de uma função cosseno) e ambos são corretos visto que a diferença é apenas questão de referencial.

A fins didáticos, a referência proposta pelo SELF3Ø agrega maior aplicabilidade nas disciplinas da engenharia elétrica (como sistemas elétricos e transmissão de energia elétrica) que modelam os circuitos trifásicos obedecendo a relação angular $[1\angle 0^\circ 1\angle -120^\circ 1\angle 120^\circ]$, baseada em fasores com referências do tipo cosseno.

Foi realizado os mesmos testes para todos os outros métodos de estimação fasorial disponíveis no simulador SELF3Ø (AFMC, FCOS, FCSM, AGKC e MIMIC) e os valores são os esperados de forma teórica, normalmente com variações nos ângulos dos fasores, em virtude das características inerentes dos filtros aplicados em cada técnica de estimação. A Tabela AP1 do Apêndice D apresenta os resultados para cada método de estimação adicional.

Tabela 36 - Fasores estimados utilizando o AFCC para frequência fundamental e 3º Ciclo para o Cenário 4

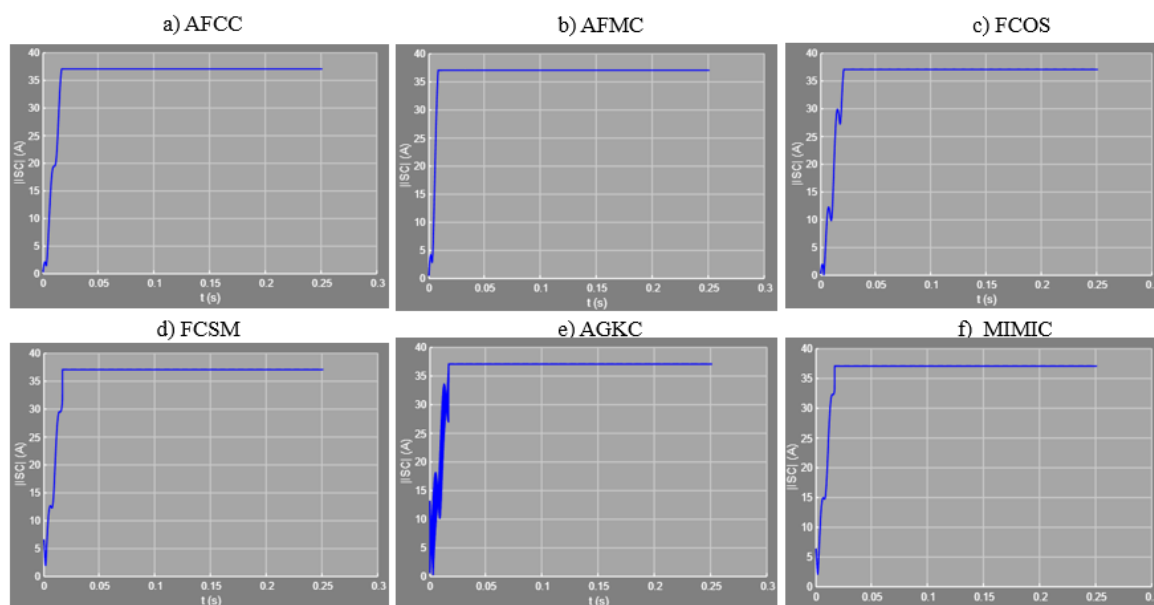
Fasor Pré-Falta (3º Ciclo)	ATP (AFCC)	SELF3Ø (AFCC)
VSA	$1,146. 10^5 \angle 91,58^\circ$	$1,146. 10^5 \angle 1,584^\circ$
VSB	$1,146. 10^5 \angle - 28,42^\circ$	$1,146. 10^5 \angle - 118,4^\circ$
VSC	$1,146. 10^5 \angle - 148,4^\circ$	$1,146. 10^5 \angle 121,6^\circ$
ISA	$37 \angle 27,66^\circ$	$37 \angle - 62,34^\circ$
ISB	$37,01 \angle - 92,34^\circ$	$37,01 \angle 177,7^\circ$
ISC	$37 \angle 147,6^\circ$	$37 \angle 57,65^\circ$
VRA	$1,107. 10^5 \angle 83,43^\circ$	$1,107. 10^5 \angle - 6,573^\circ$
VRB	$1,107. 10^5 \angle - 36,58^\circ$	$1,107. 10^5 \angle - 126,6^\circ$
VRC	$1,107. 10^5 \angle - 156,6^\circ$	$1,107. 10^5 \angle 113,4^\circ$
IRA	$366,2 \angle - 87,12^\circ$	$366,2 \angle - 177,1^\circ$
IRB	$366,1 \angle 152,9^\circ$	$366,1 \angle 62,88^\circ$
IRC	$366,1 \angle 32,89^\circ$	$366,1 \angle - 57,11^\circ$
VPA	$1,116. 10^5 \angle 99,75^\circ$	$1,116. 10^5 \angle 9,755^\circ$
VPB	$1,116. 10^5 \angle - 20,2^\circ$	$1,116. 10^5 \angle - 110^\circ$
VPC	$1,116. 10^5 \angle - 140,2^\circ$	$1,116. 10^5 \angle 129,8^\circ$
IPA	$380,8 \angle 114,8^\circ$	$380,8 \angle 24,83^\circ$
IPB	$380,8 \angle - 5,165^\circ$	$380,8 \angle - 95,16^\circ$
IPC	$380,8 \angle - 125,8^\circ$	$380,8 \angle 144,8^\circ$

Fonte: Autoria Própria (2020)

Para medição a três terminais não foi introduzido nenhum algoritmo para sincronização de dados e assim, os dados inseridos devem ser sincronizados. A dedução do algoritmo proposto por Monteiro et al. (2018) não se aplica a essa configuração de sistema.

A Figura 68 apresenta o comportamento do janelamento para o fasor *ISC* considerando os métodos de estimação disponíveis junto ao SELF3Ø, de forma que esse gráfico pode ser utilizado para analisar os fasores de pré-falta. Os valores dos índices de despenho (ID_1 , ID_2 e ID_3) para a curva que representa a estimação pré-falta para o fasor ISC é apresentado na Tabela AP2 do Apêndice D.

Figura 68 - Curva do janelamento de dados para estimação fasorial da corrente ISC pré-falta no Cenário 4

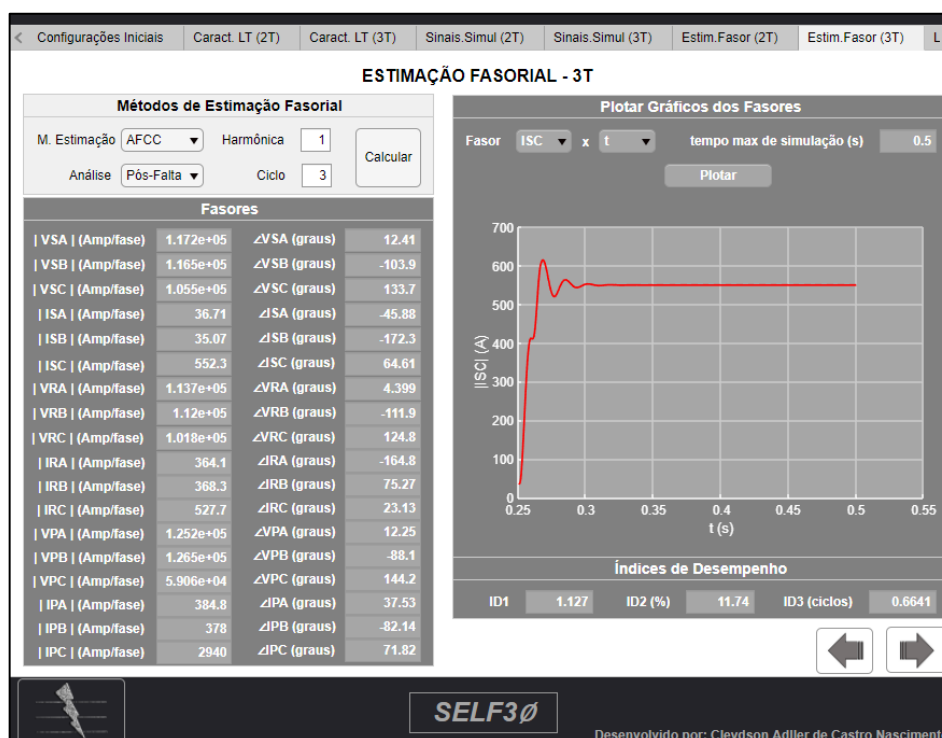


Fonte: Autoria Própria (2020)

6.4.2.2. Fasores Pós-Falta

A Figura 69 mostra a página de estimação do SELF3Ø com os valores calculados para um regime pós-falta, considerando o 3º ciclo com base no Algoritmo de Fourier de Ciclo Completo (AFCC) e os resultados comparativos são apresentados na Tabela 37.

Figura 69 - Página "Estimação Fasorial -3T" Pós-Falta para Cenário 4



Fonte: Autoria Própria (2020)

Tabela 37 - Fasores estimados utilizando o AFCC para frequência fundamental e 3º Ciclo para o Cenário 4

Fasor Pós-Falta (3º Ciclo)	ATP (AFCC)	SELF3Ø (AFCC)
VSA	$1,173 \cdot 10^5 \angle 89,75^\circ$	$1,172 \cdot 10^5 \angle 12,41^\circ$
VSB	$1,165 \cdot 10^5 \angle -26,53^\circ$	$1,165 \cdot 10^5 \angle -103,9^\circ$
VSC	$1,054 \cdot 10^5 \angle -149^\circ$	$1,055 \cdot 10^5 \angle 133,7^\circ$
ISA	$36,57 \angle 31,16^\circ$	$36,71 \angle -45,88^\circ$
ISB	$35,32 \angle -95,01^\circ$	$35,07 \angle -172,3^\circ$
ISC	$551,8 \angle 142^\circ$	$552,3 \angle 64,61^\circ$
VRA	$1,138 \cdot 10^5 \angle 81,75^\circ$	$1,137 \cdot 10^5 \angle 4,399^\circ$
VRB	$1,12 \cdot 10^5 \angle -34,5^\circ$	$364,1 \angle -164,8^\circ$
VRC	$1,017 \cdot 10^5 \angle -157,9^\circ$	$368,3 \angle 75,27^\circ$
IRA	$364,3 \angle -87,44^\circ$	$527,7 \angle 23,13^\circ$
IRB	$368,3 \angle 152,6^\circ$	$1,252 \cdot 10^5 \angle 12,25^\circ$
IRC	$526,8 \angle 100,5^\circ$	$1,265 \cdot 10^5 \angle -88,1^\circ$
VPA	$1,251 \cdot 10^5 \angle 89,6^\circ$	$5,906 \cdot 10^4 \angle 144,2^\circ$
VPB	$1,265 \cdot 10^5 \angle -10,79^\circ$	$384,8 \angle 37,53^\circ$
VPC	$5,907 \cdot 10^4 \angle -138,5^\circ$	$1,172 \cdot 10^5 \angle 12,41^\circ$
IPA	$384,7 \angle 114,9^\circ$	$1,165 \cdot 10^5 \angle -103,9^\circ$
IPB	$378 \angle -4,826^\circ$	$1,055 \cdot 10^5 \angle 133,7^\circ$
IPC	$2938 \angle 149,2^\circ$	$36,71 \angle -45,88^\circ$

Fonte: Autoria Própria (2020)

De acordo com a Tabela 37 existe diferença de resultados entre os fasores, tanto com relação aos módulos, como também a respeito dos ângulos de fase, comparando os resultados obtidos junto ao ATP e SELF3Ø. Essa diferença de resultados pode ser entendida basicamente devido aos fasores estimados junto ao ATP fazerem uso de amostras a partir do valor teórico da falta (0,25 s) e os fasores calculados juntos ao SELF3Ø utilizarem de um algoritmo de localização de ponto de falta (detectando 0,2505 s).

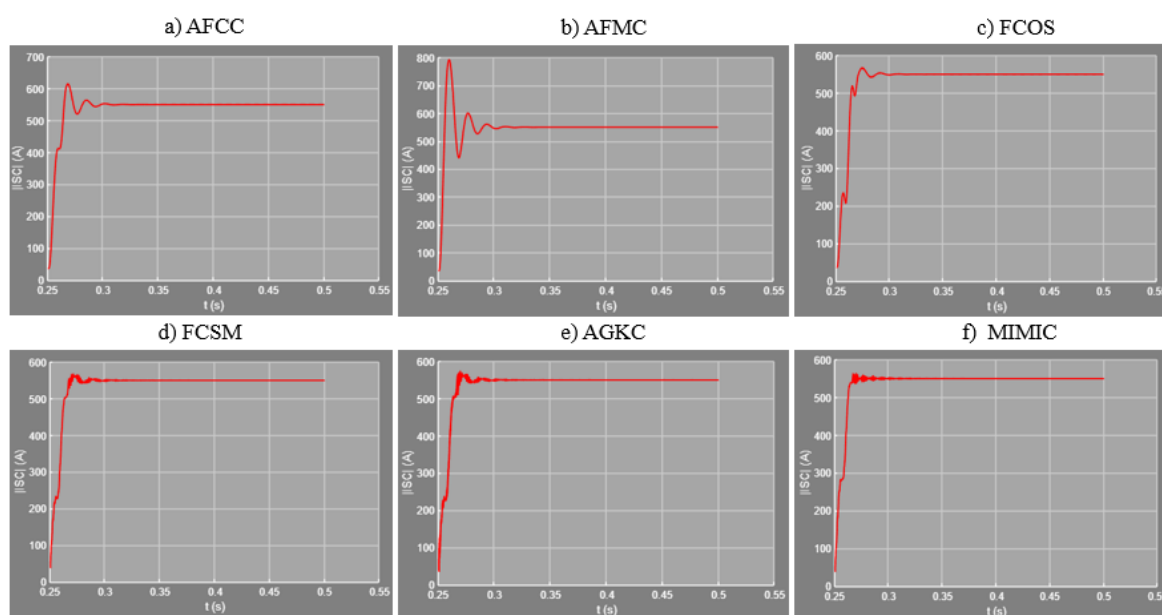
Esse contraste do ponto de início de falta proporciona um deslocamento na janela de dados (de oito amostras, nesse cenário), projetando assim uma assim essa diferença entre os fasores estimados. Vale salientar que os fasores estimados através dos dois softwares apresentam resultados próximos e aceitáveis, porém, dados apresentados junto ao SELF3Ø garantem uma análise apenas com dados pós-falta dos terminais medidores, característica essa essencial para aplicação nos algoritmos de localização de faltas.

Foi realizado os mesmos testes para todos os outros métodos de estimação fasorial disponíveis no simulador SELF3Ø (AFMC, FCOS, FCSM, AGKC e MIMIC) e os resultados são como esperado, normalmente com variações nos ângulos dos fasores, em virtude das

características inerentes dos filtros aplicados em cada técnica de estimação. A Tabela AP3 do Apêndice D apresenta os resultados para cada método de estimação adicional.

A Figura 69 apresenta o comportamento do janelamento para o fasor ISC considerando os métodos de estimação disponíveis junto ao SELF3Ø, de forma que esse gráfico pode ser utilizado para analisar os fasores de pós-falta. Os valores dos índices de despenho (ID_1 , ID_2 e ID_3) para a curva que representa a estimação pós-falta para o fasor ISC é apresentado na Tabela AP4 do Apêndice D.

Figura 70 - Curva do janelamento de dados para estimação fasorial da corrente ISC pós-falta no Cenário 4

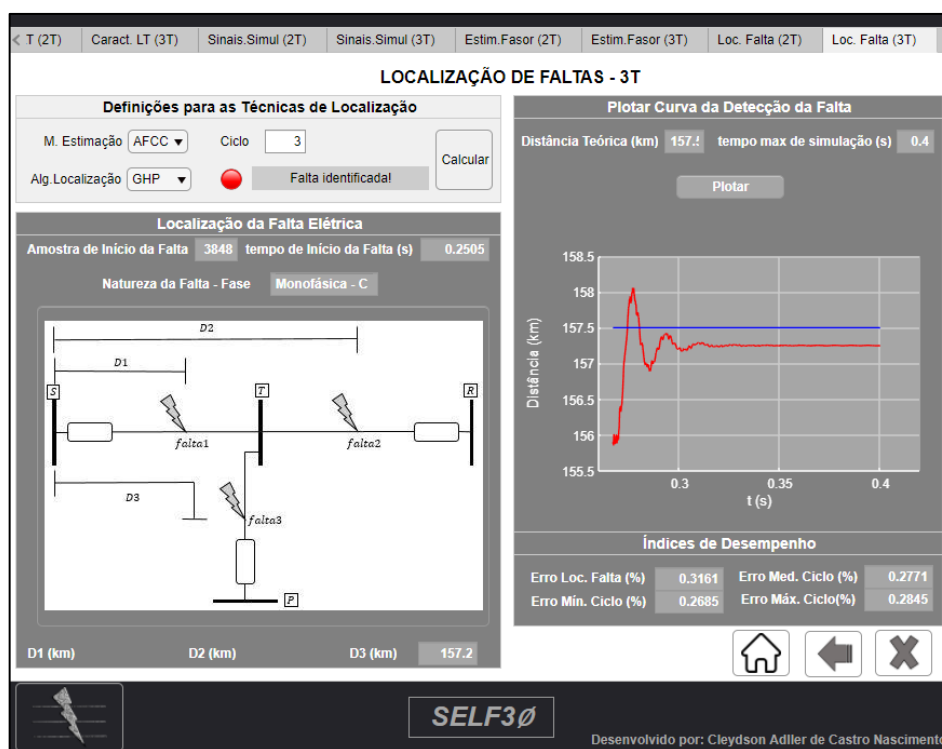


Fonte: Autoria Própria (2020)

6.4.3. Página “Localização de Faltas -3T”

A tela “Localização de Faltas -3T”, apresentada na Figura 71, mostra em seus resultados a amostra do início, o tempo inicial e a natureza da falta. Além disso, apresenta na caixa inferior a distância (D) em km para o algoritmo de GHP com medição a três terminais.

Figura 71 – Página "Localização de Falhas - 3T" relativo ao Cenário 4



Fonte: Autoria Própria (2020)

A Tabela 38 apresenta a distância (D) calculada fazendo uso dos diversos métodos de estimação fasorial apresentados no simulador (AFCC, AFMC, FCOS, FCSM, AGKC e MIMIC) considerando um algoritmo de localização de GHP com medição a 3 terminais.

Tabela 38 - Localização da Falta para o Cenário 4

Localização da Falta (D)	Teórico	GHP
AFCC – 3º Ciclo	157,5 km	157,2 km
AFMC – 3º Ciclo	157,5 km	157,4 km
FCOS – 3º Ciclo	157,5 km	157,3 km
FCSM – 3º Ciclo	157,5 km	134,5 km
AGKC – 3º Ciclo	157,5 km	157,6 km
MIMIC – 3º Ciclo	157,5 km	157,5 km

Fonte: Autoria Própria (2020)

O erro médio por ciclo ($\overline{\varepsilon_{ciclo}}$), para cada método de estimação fasorial em virtude do algoritmo de GHP com medição a três terminais pode ser observado junto a Tabela 39.

Tabela 39 - Erro Médio por Ciclo para o Cenário 4

$\overline{\varepsilon_{ciclo}}$ (%)	AFCC	AFMC	FCOS	FCSM	AGKC	MIMIC
GHP	0,2771	0,2762	0,2765	25,49	0,2773	0,2762

Fonte: Autoria Própria (2020)

6.5. CENÁRIO 5 - LT 230 kV, 3 TERMINAIS E CURTO BIFÁSICO

O último cenário apresenta dados de tensão e corrente trifásicas para um sistema de medição de 230 kV com três terminais, onde em um determinado instante de tempo, surge uma falta elétrica. A Tabela 40 apresenta as características desse sistema elétrico.

Tabela 40 - Parâmetros do Cenário 5

Parâmetros	Opções
Tipo de Medição	3 Terminais
Nível de Tensão da LT e seus parâmetros	230 kV
Tipos de Dados (com relação a sincronismo)	Sincronizados
Comprimento das LTs	$LS = LR = LP = 180$ km
Comprimento dos circuitos equivalentes (ZTH)	20 km
Nível de tensão nos terminais (S, R e P)	$V_S = 1,02 \angle 0^\circ$ p.u $V_R = 1 \angle -10^\circ$ p.u $V_P = 0,99 \angle 10^\circ$ p.u
Método de Estimação Fasorial Base	AFCC
Falta Elétrica (com relação a sua existência)	Com Falta
Ciclo de Ocorrência da Falta (caso exista)	18º Ciclo
Tipo da Falta Elétrica	Bifásica – Fases AB
Local Teórico da Falta Elétrica	225 km (entre S e R)
Algoritmo de Localização da Falta	GHP

Fonte: Autoria Própria (2020)

Os parâmetros das telas “ Configurações Iniciais ” e “ Caracterização da Linha de Transmissão – 3T ” são preenchidos conforme apresentado nas Tabelas 9, 12 e 40. Escolhe-se a tensão de base como a do valor eficaz da linha de transmissão, no caso 230 kV.

Sabe-se que a corrente elétrica é um sinal flagrante para descrever a existência ou não de uma falta em um sistema de potência. Desse modo, como os dados amostrados repercutem uma falta monofásica na fase C do SEP, será observado para fins de resultado apenas a corrente da fase b do terminal s (isb). Outros resultados dos sinais estão contidos no Apêndice E.

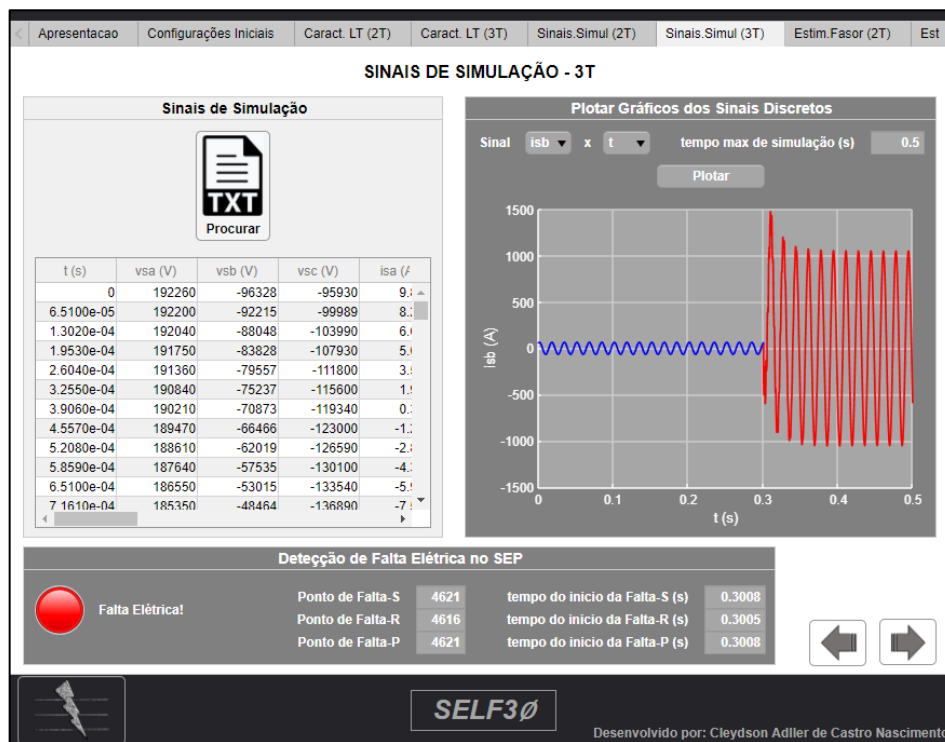
6.5.1. Página “Sinais de Simulação – 3T”

O usuário, ao inserir o arquivo do tipo “.txt”, que contém os sinais dos medidores localizados nos terminais S, R e P da linha de transmissão, pode perceber que esses dados serão apresentados em forma de planilha logo após serem inseridos, como mostra a Figura 72.

Ao clicar em “Plotar”, percebe-se que o sinal escolhido (o sinal isb) é apresentado no plano cartesiano do gráfico. A cor em azul evidencia o sinal no regime pré-falta e a cor vermelha, conseqüentemente, o regime pós-falta. Com intuito de validar a curva do sinal

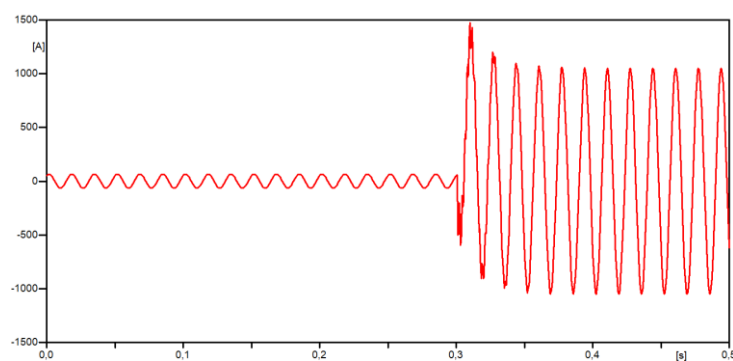
apresentado, faz-se a comparação com o sinal apresentado pelo *software* ATP, que se encontra exposto na Figura 73 e percebe-se que representam exatamente os mesmos dados.

Figura 72 - Página "Sinais de Simulação-3T" para Cenário 5 e sinal *isc*



Fonte: Autoria Própria (2020)

Figura 73 - Sinal *isb* apresentado no software ATP para o Cenário 5



Fonte: ATP (2020)

Como a simulação retrata um sistema com perturbações, nota-se no bloco “Deteção de Falta Elétrica no SEP” a lâmpada indicativa em cor vermelha e os pontos de falta e tempo do início da falta preenchidos, como mostra a Figura 72. A Tabela 41 apresenta os valores dos pontos de falta e dos tempos do início da falta teóricos e apresentados pelo simulador.

Tabela 41 - Ponto de falta e Tempo de Falta para o Cenário 5

Detecção da Falta	Teórico	SELF3Ø Terminal S	SELF3Ø Terminal R	SELF3Ø Terminal P
Amostra de início	4608	4621	4616	4621
Tempo de início (s)	0,3	0,3008	0,3005	0,3008

Fonte: Autoria Própria (2020)

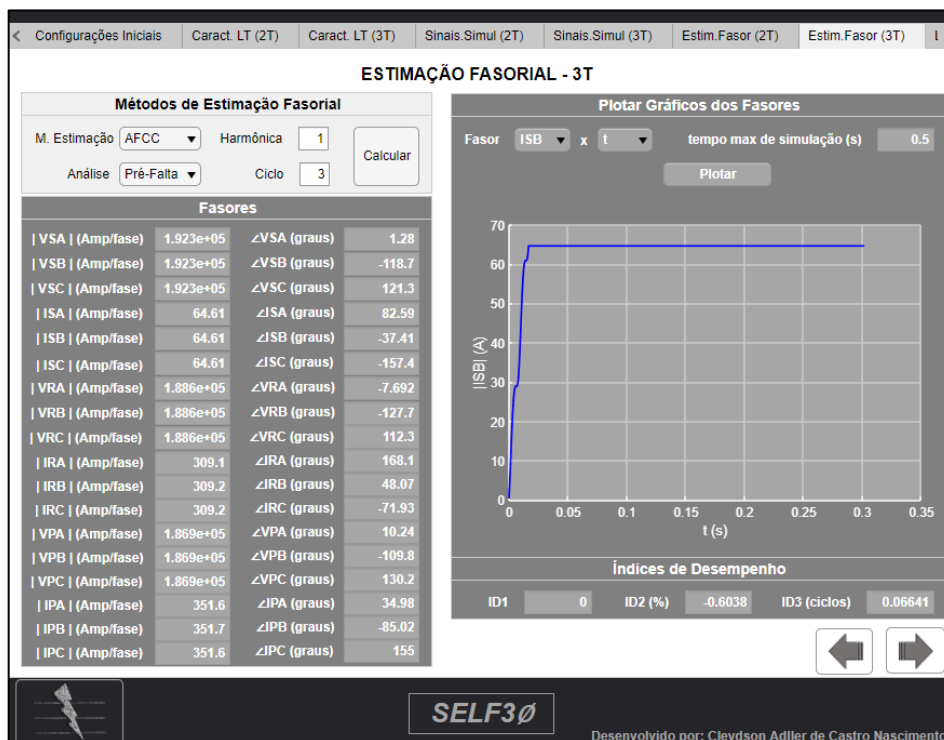
6.5.2. Página “Estimação Fasorial -3T”

Devido a existência de uma falta elétrica no sistema de potência simulado e das características do simulador, surgem fasores de dados em regime de pré-falta e pós-falta e assim, torna-se necessário dividir esse estudo de estimação fasorial em duas seções. Para simular os fasores define-se a harmônica fundamental (harmônica=1) a partir do terceiro ciclo de amostras. Os fasores escolhidos são sempre definidos uma amostra após o ciclo desejado.

6.5.2.1. Fasores Pré-Falta

A Figura 74 apresenta a página de estimação do SELF3Ø com os valores calculados para um regime pré-falta. Com o objetivo de validar também a estimação fasorial da interface gráfica, esses fasores são calculados para o 3º ciclo de amostras com base no Algoritmo de Fourier de Ciclo Completo (AFCC), única técnica de estimação apresentada no *software* ATP.

Figura 74 - Página "Estimação Fasorial -3T" Pré-Falta para Cenário 5



Fonte: Autoria Própria (2020)

Para validação da estimação fasorial, compara-se os fasores calculados através do *software* ATP e do SELF3Ø, como mostra a Tabela 42, onde percebe-se que os resultados são semelhantes em módulo e divergem nos ângulos de fase. Isso acontece devido ao ATP considerar como referência angular fasorial o ângulo de 90° (representação de um fasor através de uma função seno) e o SELF3Ø faz referência a um fasor no ângulo de 0° (representação de um fasor através de uma função cosseno) e ambos são corretos visto que a diferença é apenas questão de referencial.

A fins didáticos, a referência proposta pelo SELF3Ø agrega maior aplicabilidade nas disciplinas da engenharia elétrica (como sistemas elétricos e transmissão de energia elétrica) que modelam os circuitos trifásicos obedecendo a relação angular $[1\angle 0^\circ 1\angle -120^\circ 1\angle 120^\circ]$, baseada em fasores com referências do tipo cosseno.

Tabela 42 - Fasores estimados utilizando o AFCC para frequência fundamental e 3º Ciclo para o Cenário 5

Fasor Pré-Falta (3º Ciclo)	ATP (AFCC)	SELF3Ø (AFCC)
VSA	$1,923 \cdot 10^5 \angle 91,28^\circ$	$1,923 \cdot 10^5 \angle 1,28^\circ$
VSB	$1,923 \cdot 10^5 \angle -28,72^\circ$	$1,923 \cdot 10^5 \angle -118,7^\circ$
VSC	$1,923 \cdot 10^5 \angle -148,3^\circ$	$1,923 \cdot 10^5 \angle 121,3^\circ$
ISA	$64,61 \angle 172,6^\circ$	$64,61 \angle 82,59^\circ$
ISB	$64,61 \angle 52,59^\circ$	$64,61 \angle -37,41^\circ$
ISC	$64,61 \angle -67,41^\circ$	$64,61 \angle -157,4^\circ$
VRA	$1,886 \cdot 10^5 \angle 82,31^\circ$	$1,886 \cdot 10^5 \angle -7,692^\circ$
VRB	$1,886 \cdot 10^5 \angle -37,69^\circ$	$1,886 \cdot 10^5 \angle -127,7^\circ$
VRC	$1,886 \cdot 10^5 \angle -157,7^\circ$	$1,886 \cdot 10^5 \angle 112,3^\circ$
IRA	$309,1 \angle -101,9^\circ$	$309,1 \angle 168,1^\circ$
IRB	$309,2 \angle 138,1^\circ$	$309,2 \angle 48,07^\circ$
IRC	$309,2 \angle 18,07^\circ$	$309,2 \angle -71,93^\circ$
VPA	$1,869 \cdot 10^5 \angle 100,2^\circ$	$1,869 \cdot 10^5 \angle 10,24^\circ$
VPB	$1,869 \cdot 10^5 \angle -19,76^\circ$	$1,869 \cdot 10^5 \angle -109,2^\circ$
VPC	$1,869 \cdot 10^5 \angle -139,8^\circ$	$1,869 \cdot 10^5 \angle 130,2^\circ$
IPA	$351,6 \angle 125^\circ$	$351,6 \angle 34,98^\circ$
IPB	$351,7 \angle 4,98^\circ$	$351,7 \angle -85,02^\circ$
IPC	$351,6 \angle -115^\circ$	$351,6 \angle 155^\circ$

Fonte: Autoria Própria (2020)

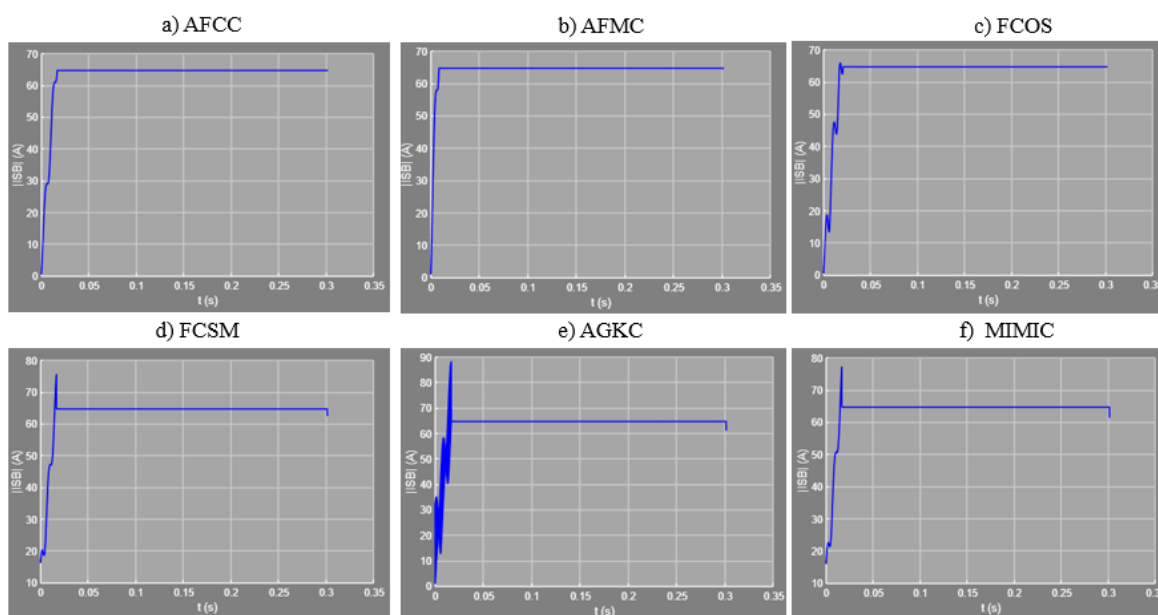
Foi realizado os mesmos testes para todos os outros métodos de estimação fasorial disponíveis no simulador SELF3Ø (AFMC, FCOS, FCSM, AGKC e MIMIC) e os resultados se apresentam como esperado teoricamente, normalmente com variações nos ângulos dos fasores, em virtude das características inerentes dos filtros aplicados em cada técnica de

estimação. A Tabela AP1 do Apêndice E apresenta os resultados para cada método de estimação adicional.

Para medição a três terminais não foi introduzido nenhum algoritmo para sincronização de dados e assim, os dados inseridos devem ser sincronizados. A dedução do algoritmo proposto por Monteiro et al. (2018) não se aplica a essa configuração de sistema.

A Figura 75 apresenta o comportamento do janelamento para o fasor ISB considerando os métodos de estimação disponíveis junto ao SELF3Ø, de forma que esse gráfico pode ser utilizado para analisar os fasores de pré-falta. Os valores dos índices de despenho (ID_1 , ID_2 e ID_3) para a curva que representa a estimação pré-falta para o fasor ISC é apresentado na Tabela AP2 do Apêndice D.

Figura 75 - Curva do janelamento de dados para estimação fasorial da corrente ISB pré-falta no Cenário 5



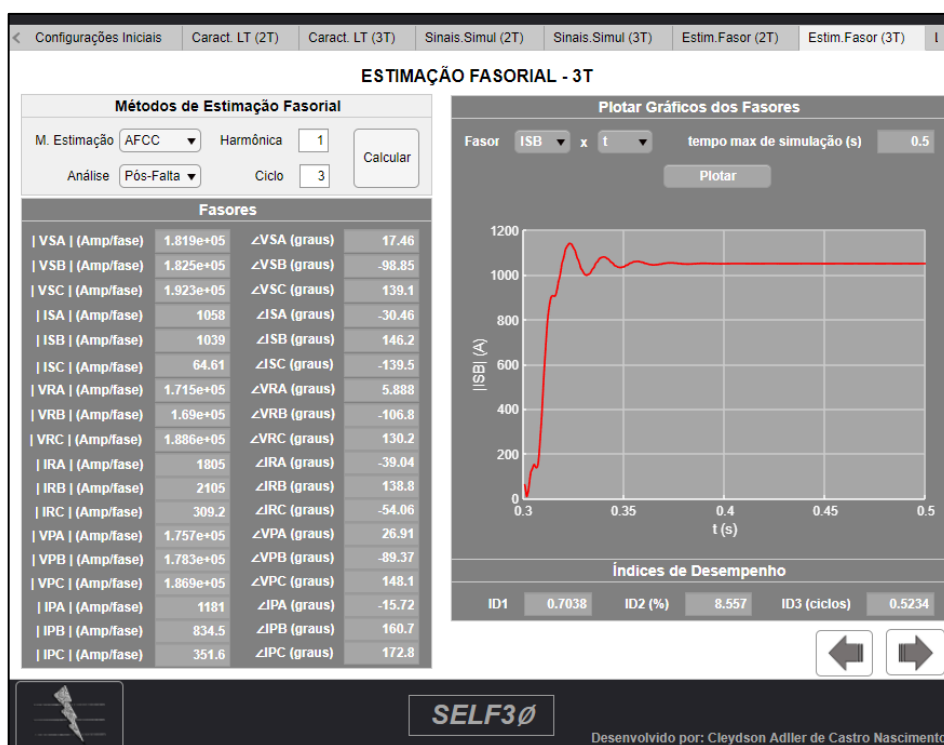
Fonte: Autoria Própria (2020)

6.5.2.2. Fasores Pós-Falta

Com o propósito de se obter também os fasores pós-falta dessa simulação, modifica-se o item “Análise” junto ao bloco “Métodos de Estimação Fasorial” para o regime pós-falta. A Figura 76 apresenta a página de estimação do SELF3Ø com os valores calculados para um regime pós-falta.

No sentido de validar as estimações da interface gráfica, os fasores pós-falta são calculados para o 3º ciclo com base no Algoritmo de Fourier de Ciclo Completo (AFCC), única técnica de estimação apresentada no *software* ATP, e os resultados comparativos entre os programas são apresentados na Tabela 43.

Figura 76 - Página "Estimação Fasorial -2T" Pós-Falta para Cenário 5



Fonte: Autoria Própria (2020)

Tabela 43 - Fasores estimados utilizando o AFCC para frequência fundamental e 3º Ciclo para o Cenário 5

Fasor Pós-Falta (3º Ciclo)	ATP (AFCC)	SELF3Ø (AFCC)
VSA	$1,82 \cdot 10^5 \angle 89,18^\circ$	$1,819 \cdot 10^5 \angle 17,46^\circ$
VSB	$1,826 \cdot 10^5 \angle -27,17^\circ$	$1,825 \cdot 10^5 \angle -98,85^\circ$
VSC	$1,923 \cdot 10^5 \angle -149,1^\circ$	$1,923 \cdot 10^5 \angle 139,1^\circ$
ISA	$1053 \angle 41,04^\circ$	$1058 \angle -30,46^\circ$
ISB	$1034 \angle -142,3^\circ$	$1039 \angle 146,2^\circ$
ISC	$64,61 \angle -67,82^\circ$	$64,61 \angle -139,5^\circ$
VRA	$1,717 \cdot 10^5 \angle 77,6^\circ$	$1,715 \cdot 10^5 \angle 5,888^\circ$
VRB	$1,691 \cdot 10^5 \angle -35,18^\circ$	$1,69 \cdot 10^5 \angle -106,8^\circ$
VRC	$1,886 \cdot 10^5 \angle -158,1^\circ$	$1,886 \cdot 10^5 \angle 130,2^\circ$
IRA	$1799 \angle 32,48^\circ$	$1805 \angle -39,04^\circ$
IRB	$2099 \angle -149,7^\circ$	$2105 \angle 138,8^\circ$
IRC	$309,2 \angle 17,66^\circ$	$309,2 \angle -54,06^\circ$
VPA	$1,759 \cdot 10^5 \angle 98,63^\circ$	$1,757 \cdot 10^5 \angle 26,91^\circ$
VPB	$1,783 \cdot 10^5 \angle -17,69^\circ$	$1,783 \cdot 10^5 \angle -89,37^\circ$
VPC	$1,869 \cdot 10^4 \angle -140,2^\circ$	$1,869 \cdot 10^4 \angle 148,1^\circ$
IPA	$1175 \angle 55,87^\circ$	$1181 \angle -15,72^\circ$
IPB	$828,9 \angle -127,8^\circ$	$834,5 \angle 160,7^\circ$
IPC	$351,6 \angle -115,4^\circ$	$351,6 \angle 172,8^\circ$

Fonte: Autoria Própria (2020)

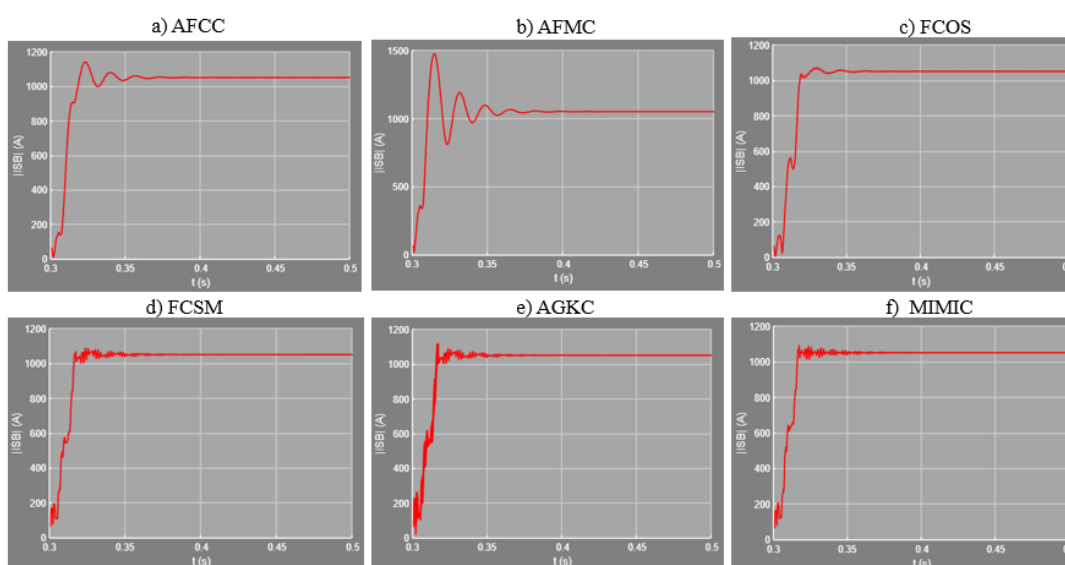
De acordo com a Tabela 43 existe diferença de resultados entre os fasores, tanto com relação aos módulos, como também a respeito dos ângulos de fase, comparando os resultados obtidos junto ao ATP e SELF3Ø. Essa diferença de resultados pode ser entendida basicamente devido aos fasores estimados junto ao ATP fazerem uso de amostras a partir do valor teórico da falta (0,3 s) e os fasores calculados juntos ao SELF3Ø utilizarem de um algoritmo de localização de ponto de falta (detectando 0,3008 s).

Esse contraste do ponto de início de falta proporciona um deslocamento na janela de dados (de treze amostras, nesse cenário), projetando assim uma assim essa diferença entre os fasores estimados. Vale salientar que os fasores estimados através dos dois softwares apresentam resultados próximos e aceitáveis, porém, dados apresentados junto ao SELF3Ø garantem uma análise apenas com dados pós-falta dos terminais medidores, característica essa essencial para aplicação nos algoritmos de localização de faltas.

Foi realizado os mesmos testes para todos os outros métodos de estimação fasorial disponíveis no simulador SELF3Ø (AFMC, FCOS, FCSM, AGKC e MIMIC) e os valores são como esperado teoricamente, normalmente com variações nos ângulos dos fasores, em virtude das características inerentes dos filtros aplicados em cada técnica de estimação. A Tabela AP3 do Apêndice E apresenta os resultados para cada método de estimação adicional.

A Figura 77 apresenta o comportamento do janelamento para o fasor *ISB* considerando os métodos de estimação disponíveis junto ao SELF3Ø. Os valores dos índices de despenho que representa a estimação pós-falta para o fasor *ISB* é apresentado na Tabela AP4 do Apêndice E.

Figura 77 - Curva do janelamento de dados para estimação fasorial da corrente *ISB* pós-falta no Cenário 5

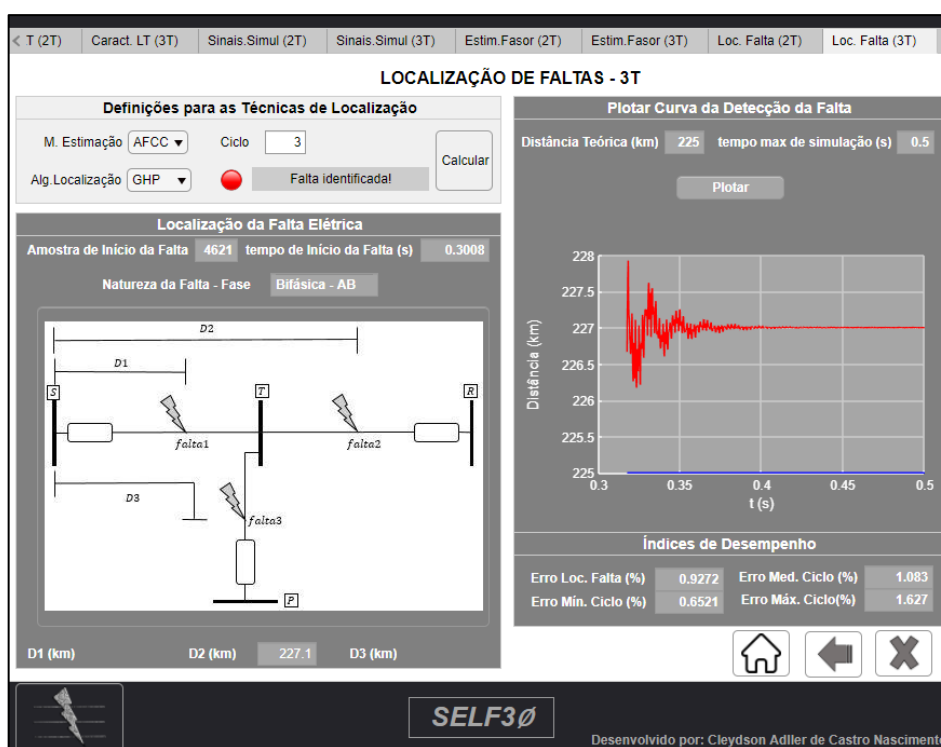


Fonte: Autoria Própria (2020)

6.5.3. Página “Localização de Faltas -3T”

A tela “Localização de Faltas -3T”, apresentada na Figura 78, mostra em seus resultados a amostra do início, o tempo inicial e a natureza da falta. Além disso, apresenta na caixa inferior a distância (D) em km para o algoritmo de GHP com medição a três terminais.

Figura 78 - Página "Localização de Faltas - 3T" relativo ao Cenário 5



Fonte: Autoria Própria (2020)

A Tabela 44 apresenta a distância (D) calculada fazendo uso dos diversos métodos de estimação fasorial apresentados no simulador (AFCC, AFMC, FCOS, FCSM, AGKC e MIMIC) considerando um algoritmo de localização de GHP com medição a 3 terminais.

Tabela 44 - Localização da Falta para o Cenário 5

Localização da Falta (D)	Teórico	GHP
AFCC – 3º Ciclo	225 km	227,1 km
AFMC – 3º Ciclo	225 km	226,8 km
FCOS – 3º Ciclo	225 km	227 km
FCSM – 3º Ciclo	225 km	210 km
AGKC – 3º Ciclo	225 km	227,1 km
MIMIC – 3º Ciclo	225 km	227 km

Fonte: Autoria Própria (2020)

O erro médio por ciclo ($\overline{\varepsilon_{ciclo}}$), para cada método de estimação fasorial em virtude do algoritmo de GHP com medição a três terminais pode ser observado junto a Tabela 45.

Tabela 45 - Erro Médio por Ciclo para o Cenário 5

$\overline{\varepsilon_{ciclo}}$ (%)	AFCC	AFMC	FCOS	FCSM	AGKC	MIMIC
GHP	1,113	1,114	1,114	8,199	1,112	1,112

Fonte: Autoria Própria (2020)

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho se propôs em desenvolver, fazendo uso de interface gráfica e programação orientada a eventos, o Simulador Didático de Estimação Fasorial e Localização de Faltas em Linhas de Transmissão Trifásica (SELF3Ø).

Essa interface demonstra a capacidade de: exibir graficamente os dados de tensões e correntes medidos junto aos terminais da linha de transmissão, detectar uma falta elétrica (caso exista), promover estimações fasoriais para dados pré-falta e pós-falta (na condição de existência de falta), apresentar graficamente a estimativa de cada fasor individual em função do janelamento e seus respectivos índices de desempenho, determinar o local de falta e a natureza da falta utilizando algoritmos de localização, além de apresentar em esboço gráfico a localização estimada da falta em função do janelamento de sinais e seus respectivos índices de desempenho.

Com a intenção de validar o simulador SELF3Ø, este trabalho apresentou cinco cenários de simulação, onde foi aplicado as mais diversas situações de análise. Os cenários apresentados foram:

- Linha de 138 kV com seus parâmetros típicos, medição a dois terminais com níveis de tensões 4% acima da nominal no terminal S e 4% abaixo no terminal R, falta monofásica (fase A) ocorrida no 12º Ciclo e localizada a 75% da linha de transmissão.
- Linha de 230 kV com seus parâmetros típicos, medição a dois terminais com níveis de tensões 2% acima da nominal no terminal S e 2% abaixo no terminal R, falta bifásica (entre as fases B e C) ocorrida no 9º Ciclo e localizada a 50% da linha de transmissão.
- Linha de 500 kV com seus parâmetros típicos, medição a dois terminais com níveis de tensões 1% acima da nominal no terminal S e 1% abaixo no terminal R, falta trifásica (entre as fases A, B e C) ocorrida no 6º Ciclo e localizada a 25% da linha de transmissão.
- Linha de 138 kV com seus parâmetros típicos, medição a três terminais com níveis de tensões 2% acima da nominal no terminal S, 2% abaixo no terminal R e 1% abaixo no terminal P, falta monofásica (fase C) ocorrida no 15º Ciclo e localizada a 75% da linha de transmissão LP.
- Linha de 230 kV com seus parâmetros típicos, medição a três terminais com níveis de tensões 2% acima da nominal no terminal S, valor nominal no terminal R e 1% abaixo no

terminal P, falta bifásica (fase A e B) ocorrida no 18º Ciclo e localizada a 25% da linha de transmissão LR.

Para estimar os fasores foi introduzido ao SELF3Ø o Algoritmo de Fourier de Ciclo Completo (AFCC), o Algoritmo de Fourier de Meio Ciclo (AFMC), o Filtro Cosseno (FCOS), o Filtro Cosseno Modificado (FCSM), o Algoritmo de Guo, Kezunovic e Chen (AGKC) e o Filtro Mímico Digital proposto por Benmouyal acoplado ao Algoritmo de Fourier de Ciclo Completo (MIMIC).

De acordo com os resultados apresentados, ambos os métodos de estimação possuem fasores aproximados em módulo e divergem nos ângulos. Essa divergência é compreensível devido as características dos filtros inerentes a cada método de estimação, apresentando o fasor em virtude de referências angulares diferentes. Dessa forma, o SELF3Ø apresenta a capacidade de estimar fasores precisos para as diversas situações.

Com relação a localização de faltas, foi implementado para medição a dois terminais o Algoritmo de Girgis, Hart e Peterson (GHP), o Algoritmo de Preston et al. (PRE) e o Algoritmo de Johns e Jamali (AJJ). Dentre essas técnicas, a única que se aplica no simulador para medição a três terminais é o Algoritmo de GHP.

É notável que, para localizar a falta, torna-se necessário para o simulador obter anteriormente os fasores pós-falta através de algum método de estimação fasorial. Percebe-se, de acordo com os resultados apresentados, que os algoritmos de localização funcionam de modo correto com valores ponto de falta próximos ao teórico.

Para as técnicas de localização que fazem uso de fasores obtidos através do Filtro Cosseno Modificado (FCSM), nota-se que o ponto de falta exhibe maiores erros de localização. Isso acontece devido a ele ser uma adaptação do Filtro Cosseno, de modo que, o atraso para definir o fasor que antes era de um quarto de ciclo agora torna-se apenas uma única amostra. Essa velocidade de convergência introduz erros de estimação.

Em síntese, o Simulador Didático de Estimação Fasorial e Localização de Faltas em Linhas de Transmissão Trifásica (SELF3Ø) apresenta-se como ferramenta para estimar fasores e localizar faltas elétricas com precisão e de modo prático e rápido.

Como proposta para trabalhos futuros, o autor desta dissertação apresenta alguns pontos para aprimorar o simulador:

- Modelar o sistema para apresentar as soluções junto a linhas de transmissão monofásicas

- Apresentar junto ao simulador a opção para introduzir linhas não transpostas ao sistema
- Abranger Métodos de Estimação com Janelas Variáveis
- Abranger Algoritmos de Localização por Métodos de Ondas Viajantes
- Apresentar outras técnicas para Localização de Faltas para Medições a três terminais

REFERÊNCIAS

- BALAMOUGAN, V.; SIDHU, T.s. A new filtering technique to eliminate decaying DC and harmonics for power system phasor estimation. **2006 IEEE Power India Conference**, [s.l.], p. 1-5, 2006.
- BENMOUYAL, Gabriel. Removal of DC-Offset in Current Waveforms Using Digital Mimic Filtering. **IEEE Transactions On Power Delivery**, Canadá, v. 10, n. 2, p.621-630, abr. 1995.
- CAMARGO, C. Celso de Brasil. **Transmissão de Energia Elétrica: Aspectos fundamentais**. 3. ed. Florianópolis: UFSC, 2006. 277 p.
- CAMPOS, Alana Kelly Xavier Santos. **Um Novo Método de Estimação Fasorial para Uso em Relés Digitais de Proteção**. 2016. 158 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2016.
- CRUZ, Melinda Cesianara Silva da. **Localização de Faltas em Linhas de Transmissão de Múltiplos Terminais a Partir de Registros Oscilográficos Sincronizados Via Transformada Wavelet**. 2010. 62 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010.
- CRUZ, Melinda Cesianara Silva da. **Metodologia de Estimação de Estados para Tratamento de Medições Errôneas e Registros Não Sincronizados em Algoritmos de Localização de Faltas em Linhas de Transmissão**. 2015. 149 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2015.
- CRUZ, Melinda Cesianara Silva da et al. Sincronização de Registros Oscilográficos em Linhas de Transmissão com Parâmetros Elétricos Desconhecidos. **VI Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos**, Natal, 2016.
- ELETROBRAS. **CGT Eletrosul**, 2020. Nosso Negócio – Transmissão. Disponível em: <<http://www.eletrosul.gov.br/nosso-negocio/transmissao/transmissao>>. Acesso em 08 de jul. de 2020.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (Brasil). Ministério de Minas e Energia. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2029**. 2019. 382 p.
- GAUTIER, Luis Reinaldo. **Localizadores Digitais de Faltas para Linhas de Transmissão de Alta Tensão**. 1996. 88 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos, 1996
- GIRGIS, A.a.; HART, D.g.; PETERSON, W.l.. A New Fault Location Technique for Two- and Three-Terminal Liness. **IEEE Transactions On Power Delivery**, [s.l.], v. 7, n. 1, p. 98-107, 1992. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).
- GLOVER, J. Duncan; SARMA, Mulukutla S.; OVERBYE, Thomas J.. **Power System Analysis and Design**. 5. ed. Stamford - Usa: Cengage Learning, 2010. 828 p.
- GUO, Yong; KEZUNOVIC, M.; CHEN, Deshu. Simplified algorithms for removal of the effect of exponentially decaying DC-offset on the fourier algorithm. **IEEE Transactions On Power Delivery**, [s.l.], v. 18, n. 3, p.711-717, jul. 2003. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).

JOHNS, A. T.; JAMALI, S.. Accurate Fault Location Technique for Power Transmission Lines. **IEE Proceedings**, v. 137, n. 6, p. 395-402, nov. 1990.

LATHI, B. P. **Sinais e Sistemas Lineares**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2007. 856 p.

MACHADO, Eubis Pereira. **Compensação Dinâmica dos Transitórios de Baixa Frequência de Transformadores de Potencial Capacitivos para Otimização da Proteção de Linhas de Transmissão**. 2013. 173 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2013.

MARSOLLA, Rafael. **Estimação Fasorial em Tempo Real Utilizando um Algoritmo Genético Compacto Multiobjetivo**. 2015. 160 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2015.

MASCHER, Leandro Jacob Dantas. **Análise do Desempenho de Algoritmos de Proteção de Distância frente à Falhas Monofásicas: abordagem tendo em vista uma proteção adaptativa**. Abordagem tendo em vista uma proteção adaptativa. 2010. 165 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2010.

MONTEIRO, Roana D.s. et al. Um Novo Algoritmo Para Sincronização de Registros Oscilográficos em Linhas de Transmissão com Parâmetros Elétricos Desconhecidos. **XXII Congresso Brasileiro de Automática**, João Pessoa, 2018.

NISE, Norman S.. **Engenharias de Sistemas de Controle**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013. 1285 p.

OLIVEIRA, Nelson L. S.; SOUZA, Benemar A. de. Effects of the Exponentially Decaying DC Offset in the Phasor Estimation Algorithms Performance. **2012 Sixth IEEE/pes Transmission And Distribution: Latin America Conference And Exposition (T&D-LA)**, Montevideo, p.1-5, 2012.

PAITHANKAR, Y. G.; BHIDE, S. R. **Fundamentals of Power System Protection**. New Delhi: Phi, 2003. 287 p.

PHADKE, Arun G.; THORP, James S. **Computer Relaying for Power Systems**. 2. ed. England: Research Studies Press Limited. John Wiley And Sons Ltd, 2009. 326 p.

PRESTON, G. et al. New Settings-Free Fault Location Algorithm Based on Synchronised Sampling. **IET Generation, Transmission & Distribution**, [s.l.], v. 5, n. 3, p. 376-383, 2011. Institution of Engineering and Technology (IET).

RAYBOLT, Ana Carolina da Silva. **Localização de Falhas em Linhas de Transmissão em Circuito Duplo Utilizando Redes Neurais Artificiais**. 2011. 142 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Coppe, Rio de Janeiro, 2011.

SANTO, Silvio Giuseppe Di. **Localização de Falhas em Linhas de Transmissão com Derivações, Constituídas por Circuitos Duplo e Trechos Não Transpostos**. 2013. 138 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa em Ciências - Engenharia Elétrica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

SCHWEITZER, Edmund O.; HOU, Daqing. Filtering for Protective Relays. **19th Annual Western Protective Relay Conference**, p. 1-.24, out. 1992.

SILVA, Kleber Melo e. **Estimação de Fasores Baseada na Transformada Wavelet para Uso na Proteção de Distância de Linhas de Transmissão.** 2009. 208 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2009.

SILVA, Raphael Philipe Mendes da. **Algoritmos Genéticos Aplicados à Estimação Fasorial em Sistemas Elétricos de Potência.** 2012. 126 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Engenharia Elétrica, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2012.

SILVA, Thiago Vieira da. **Algoritmos Evolutivos como Estimadores de Frequência de Fase de Sinais Elétricos: métodos multiobjetivos e paralelização em FPGAs.** 2013. 88 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

SILVEIRA, Eduardo Gonzaga da. **Localização de Faltas em Linhas de Transmissão: desenvolvimento de novos algoritmos e implementação de sistema computacional para aplicações práticas.** 2007. 188 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

APÊNDICE A

OUTROS RESULTADOS DO CENÁRIO 1

Tabela AP1 – Fasores Pré-falta Utilizando Os Métodos AFMC, FCOS, FCSM, AGKC E MIMIC para o Cenário 1 de Simulação

Fasor Pré-Falta (3º Ciclo)	SELF3Ø (AFMC)	SELF3Ø (FCOS)	SELF3Ø (FCSM)
<i>VSA</i>	$1,158 \cdot 10^5 \angle 179,9^\circ$	$1,158 \cdot 10^5 \angle -90,11^\circ$	$1,158 \cdot 10^5 \angle 1,519^\circ$
<i>VSB</i>	$1,158 \cdot 10^5 \angle 59,88^\circ$	$1,158 \cdot 10^5 \angle -149,9^\circ$	$1,158 \cdot 10^5 \angle 121,5^\circ$
<i>VSC</i>	$1,158 \cdot 10^5 \angle -60,12^\circ$	$1,158 \cdot 10^5 \angle 29,89^\circ$	$1,158 \cdot 10^5 \angle -118,5^\circ$
<i>ISA</i>	$345,6 \angle 168,8^\circ$	$345,6 \angle -101,2^\circ$	$345,6 \angle 12,59^\circ$
<i>ISB</i>	$345,6 \angle 48,81^\circ$	$345,6 \angle 138,8^\circ$	$345,6 \angle 132,6^\circ$
<i>ISC</i>	$345,6 \angle -71,19^\circ$	$345,6 \angle 18,82^\circ$	$345,6 \angle -107,4^\circ$
<i>VRA</i>	$1,095 \cdot 10^5 \angle 173^\circ$	$1,095 \cdot 10^5 \angle -97,03^\circ$	$1,095 \cdot 10^5 \angle 8,438^\circ$
<i>VRB</i>	$1,095 \cdot 10^5 \angle 52,96^\circ$	$1,095 \cdot 10^5 \angle 143^\circ$	$1,095 \cdot 10^5 \angle 128,4^\circ$
<i>VRC</i>	$1,095 \cdot 10^5 \angle -67,04^\circ$	$1,095 \cdot 10^5 \angle 22,97^\circ$	$1,095 \cdot 10^5 \angle -111,6^\circ$
<i>IRA</i>	$352,3 \angle -17,07^\circ$	$352,3 \angle 72,94^\circ$	$352,3 \angle -161,5^\circ$
<i>IRB</i>	$352,3 \angle -137,1^\circ$	$352,3 \angle -47,06^\circ$	$352,3 \angle -41,52^\circ$
<i>IRC</i>	$352,3 \angle 102,9^\circ$	$352,3 \angle -167,1^\circ$	$352,3 \angle 78,47^\circ$
Fasor Pré-Falta (3º Ciclo)	SELF3Ø (AGKC)	SELF3Ø (MIMIC)	
<i>VSA</i>	$1,158 \cdot 10^5 \angle -0,129^\circ$	$1,158 \cdot 10^5 \angle 75,18^\circ$	
<i>VSB</i>	$1,158 \cdot 10^5 \angle -120,1^\circ$	$1,158 \cdot 10^5 \angle -44,83^\circ$	
<i>VSC</i>	$1,158 \cdot 10^5 \angle 119,9^\circ$	$1,158 \cdot 10^5 \angle -164,8^\circ$	
<i>ISA</i>	$345,6 \angle -11,18^\circ$	$345,6 \angle 64,1^\circ$	
<i>ISB</i>	$345,6 \angle -131,2^\circ$	$345,6 \angle -55,9^\circ$	
<i>ISC</i>	$345,6 \angle 108,8^\circ$	$345,6 \angle -175,9^\circ$	
<i>VRA</i>	$1,095 \cdot 10^5 \angle -7,018^\circ$	$1,095 \cdot 10^5 \angle 68,26^\circ$	
<i>VRB</i>	$1,095 \cdot 10^5 \angle -127^\circ$	$1,095 \cdot 10^5 \angle -51,75^\circ$	
<i>VRC</i>	$1,095 \cdot 10^5 \angle 113^\circ$	$1,095 \cdot 10^5 \angle -171,7^\circ$	
<i>IRA</i>	$352,3 \angle 162,9^\circ$	$352,3 \angle -121,8^\circ$	
<i>IRB</i>	$352,3 \angle 42,93^\circ$	$352,3 \angle 118,2^\circ$	
<i>IRC</i>	$352,3 \angle -77,07^\circ$	$352,3 \angle -1,781^\circ$	

Fonte: Autoria Própria (2020)

Tabela AP2 – Índices de desempenho para a estimação do Fasor ISA para o regime pré-falta do Cenário 1

ID - ISA (Pré-Falta)	AFCC	AFMC	FCOS	FCSM	AGKC	MIMIC
<i>ID₁</i>	0	0	0,254	0,1862	6,036	0,3974
<i>ID₂</i> (%)	-0,1242	-0,1243	2,514	10,75	32,47	16,6
<i>ID₃</i> (ciclos)	0,02734	0,5117	0,2227	0,003906	0	0,0039

Fonte: Autoria Própria (2020)

Tabela AP3 – Fasores Pós-falta Utilizando Os Métodos AFMC, FCOS, FCSM, AGKC E MIMIC para o Cenário 1 de Simulação

Fasor Pós-Falta (3º Ciclo)	SELF3Ø (AFMC)	SELF3Ø (FCOS)	SELF3Ø (FCSM)
<i>VSA</i>	$9,042 \cdot 10^4 \angle -171,9^\circ$	$9,046 \cdot 10^4 \angle -81,96^\circ$	$9,033 \cdot 10^4 \angle -6,131^\circ$
<i>VSB</i>	$1,213 \cdot 10^5 \angle 61,49^\circ$	$1,213 \cdot 10^5 \angle 151,5^\circ$	$1,219 \cdot 10^5 \angle 119,7^\circ$
<i>VSC</i>	$1,231 \cdot 10^5 \angle -48,79^\circ$	$1,231 \cdot 10^5 \angle 41,2^\circ$	$1,225 \cdot 10^5 \angle -130^\circ$
<i>ISA</i>	$1570 \angle 117,3^\circ$	$1567 \angle -152,7^\circ$	$1567 \angle 64,08^\circ$
<i>ISB</i>	$347,2 \angle 55,77^\circ$	$347,3 \angle 145,8^\circ$	$346,1 \angle 125,8^\circ$
<i>ISC</i>	$343,7 \angle -64,3^\circ$	$343,6 \angle 25,71^\circ$	$344,8 \angle -114,2^\circ$
<i>VRA</i>	$5,728 \cdot 10^4 \angle 178,1^\circ$	$5,728 \cdot 10^4 \angle -91,9^\circ$	$5,727 \cdot 10^4 \angle 3,243^\circ$
<i>VRB</i>	$1,243 \cdot 10^5 \angle 50,05^\circ$	$1,243 \cdot 10^5 \angle 140,1^\circ$	$1,242 \cdot 10^5 \angle 131,4^\circ$
<i>VRC</i>	$1,23 \cdot 10^5 \angle -50,13^\circ$	$1,23 \cdot 10^5 \angle 39,88^\circ$	$1,231 \cdot 10^5 \angle -128,4^\circ$
<i>IRA</i>	$2779 \angle 98,86^\circ$	$2773 \angle -171,3^\circ$	$2773 \angle 82,58^\circ$
<i>IRB</i>	$350,4 \angle -130,6^\circ$	$350,4 \angle -40,59^\circ$	$351,7 \angle -48,19^\circ$
<i>IRC</i>	$354,7 \angle 109,6^\circ$	$354,7 \angle -160,4^\circ$	$353 \angle 71,15^\circ$
Fasor Pós-Falta (3º Ciclo)	SELF3Ø (AGKC)	SELF3Ø (MIMIC)	
<i>VSA</i>	$9,032 \cdot 10^4 \angle 7,514^\circ$	$9,055 \cdot 10^4 \angle 82,84^\circ$	
<i>VSB</i>	$1,219 \cdot 10^5 \angle -118,3^\circ$	$1,218 \cdot 10^5 \angle -42,99^\circ$	
<i>VSC</i>	$1,225 \cdot 10^5 \angle 131,4^\circ$	$1,224 \cdot 10^5 \angle -153,4^\circ$	
<i>ISA</i>	$1567 \angle -62,67^\circ$	$1567 \angle 12,64^\circ$	
<i>ISB</i>	$345,9 \angle -124,4^\circ$	$346,3 \angle -49,1^\circ$	
<i>ISC</i>	$345 \angle 115,6^\circ$	$344,9 \angle -169,1^\circ$	
<i>VRA</i>	$5,727 \cdot 10^4 \angle -1,8^\circ$	$5,726 \cdot 10^4 \angle 73,45^\circ$	
<i>VRB</i>	$1,241 \cdot 10^5 \angle -130^\circ$	$1,242 \cdot 10^5 \angle -54,7^\circ$	
<i>VRC</i>	$1,232 \cdot 10^5 \angle 129,8^\circ$	$1,231 \cdot 10^5 \angle -154,9^\circ$	
<i>IRA</i>	$2773 \angle -81,17^\circ$	$2773 \angle -5,885^\circ$	
<i>IRB</i>	$351,7 \angle 49,59^\circ$	$351,4 \angle 124,9^\circ$	
<i>IRC</i>	$353 \angle -70,35^\circ$	$353 \angle 4,87^\circ$	

Fonte: Autoria Própria (2020)

Tabela AP4– Índices de desempenho para a estimação do Fasor ISA para o regime pós-falta do Cenário 1

ID - ISA (Pós-Falta)	AFCC	AFMC	FCOS	FCSM	AGKC	MIMIC
<i>ID₁</i>	0,01833	0,2515	0,001267	0,01062	0,01729	0,008553
<i>ID₂</i> (%)	1,515	5,581	0,4084	2,375	4,132	2,649
<i>ID₃</i> (ciclos)	0,125	0,06641	0,1094	0,03125	0,01563	0,03125

Fonte: Autoria Própria (2020)

Tabela AP5 – Localização de Falta utilizando os métodos de Estimação AFMC, FCOS, FCSM, AGKC e MIMIC, considerando o Cenário 1 de Simulação

Localização da Falta (D)	Teórico	GHP	PRE	AJJ
AFMC – 3º Ciclo	67,5 km	67,42 km	67,4 km	67,46 km
FCOS – 3º Ciclo	67,5 km	67,44 km	67,43 km	67,49 km
FCSM – 3º Ciclo	67,5 km	52, 87 km	67,38 km	51,66 km
AGKC – 3º Ciclo	67,5 km	67,44 km	67,43 km	67,47 km
MIMIC – 3º Ciclo	67,5 km	67,48 km	67,44 km	67,5 km

Fonte: Autoria Própria (2020)

APÊNDICE B

OUTROS RESULTADOS DO CENÁRIO 2

Tabela AP1 – Fasores Pré-falta Utilizando Os Métodos AFMC, FCOS, FCSM, AGKC E MIMIC para o Cenário 2 de Simulação

Fasor Pré-Falta (3º Ciclo)	SELF3Ø (AFMC)	SELF3Ø (FCOS)	SELF3Ø (FCSM)
<i>VSA</i>	$1,913 \cdot 10^5 \angle -179,6^\circ$	$1,913 \cdot 10^5 \angle -89,56^\circ$	$1,913 \cdot 10^5 \angle 0,95^\circ$
<i>VSB</i>	$1,913 \cdot 10^5 \angle 60,43^\circ$	$1,913 \cdot 10^5 \angle 150,4^\circ$	$1,913 \cdot 10^5 \angle 121^\circ$
<i>VSC</i>	$1,913 \cdot 10^5 \angle -59,57^\circ$	$1,912 \cdot 10^5 \angle 30,43^\circ$	$1,912 \cdot 10^5 \angle -119,1^\circ$
<i>ISA</i>	$291,1 \angle -175,8^\circ$	$291,1 \angle -85,79^\circ$	$291,1 \angle -2,181^\circ$
<i>ISB</i>	$291,2 \angle 64,2^\circ$	$291,1 \angle 154,2^\circ$	$291,1 \angle 117,2^\circ$
<i>ISC</i>	$291,1 \angle -55,81^\circ$	$291,1 \angle 34,2^\circ$	$291,1 \angle -122,8^\circ$
<i>VRA</i>	$1,851 \cdot 10^5 \angle 172,3^\circ$	$1,851 \cdot 10^5 \angle -97,73^\circ$	$1,851 \cdot 10^5 \angle 9,12^\circ$
<i>VRB</i>	$1,851 \cdot 10^5 \angle 52,26^\circ$	$1,851 \cdot 10^5 \angle 142,3^\circ$	$1,851 \cdot 10^5 \angle 129,1^\circ$
<i>VRC</i>	$1,851 \cdot 10^5 \angle -67,74^\circ$	$1,851 \cdot 10^5 \angle 22,26^\circ$	$1,851 \cdot 10^5 \angle -110,9^\circ$
<i>IRA</i>	$296,5 \angle -17,03^\circ$	$296,5 \angle 72,98^\circ$	$296,5 \angle -161,6^\circ$
<i>IRB</i>	$296,5 \angle -137^\circ$	$296,5 \angle -47,02^\circ$	$296,5 \angle -41,59^\circ$
<i>IRC</i>	$296,5 \angle 103^\circ$	$296,5 \angle -167^\circ$	$296,5 \angle 78,41^\circ$
Fasor Pré-Falta (3º Ciclo)	SELF3Ø (AGKC)	SELF3Ø (MIMIC)	
<i>VSA</i>	$1,913 \cdot 10^5 \angle 0,448^\circ$	$1,913 \cdot 10^5 \angle 79,77^\circ$	
<i>VSB</i>	$1,912 \cdot 10^5 \angle -119,6^\circ$	$1,912 \cdot 10^5 \angle -40,23^\circ$	
<i>VSC</i>	$1,912 \cdot 10^5 \angle 120,4^\circ$	$1,912 \cdot 10^5 \angle -160,2^\circ$	
<i>ISA</i>	$291,1 \angle 4,2^\circ$	$291,1 \angle 83,54^\circ$	
<i>ISB</i>	$291,1 \angle -115,8^\circ$	$291,1 \angle -36,46^\circ$	
<i>ISC</i>	$291,2 \angle 124,2^\circ$	$291,1 \angle -156,5^\circ$	
<i>VRA</i>	$1,851 \cdot 10^5 \angle -7,72^\circ$	$1,851 \cdot 10^5 \angle 71,6^\circ$	
<i>VRB</i>	$1,851 \cdot 10^5 \angle -127,7^\circ$	$1,851 \cdot 10^5 \angle -48,4^\circ$	
<i>VRC</i>	$1,851 \cdot 10^5 \angle 112,3^\circ$	$1,851 \cdot 10^5 \angle -168,4^\circ$	
<i>IRA</i>	$296,5 \angle 163^\circ$	$296,5 \angle -117,7^\circ$	
<i>IRB</i>	$296,5 \angle 42,98^\circ$	$296,5 \angle 122,3^\circ$	
<i>IRC</i>	$296,5 \angle -77,03^\circ$	$296,4 \angle 2,312^\circ$	

Fonte: Autoria Própria (2020)

Tabela AP2 – Índices de desempenho para a estimação do Fasor ISB para o regime pré-falta

ID - ISB (Pré-Falta)	AFCC	AFMC	FCOS	FCSM	AGKC	MIMIC
<i>ID₁</i>	0,00051	0,00054	0,00044	0,00039	0,00039	0,00039
<i>ID₂</i> (%)	0,05494	0,0621	0,05223	0,04715	0,05477	0,04731
<i>ID₃</i> (ciclos)	0,0625	0,5391	0,1914	0,0039	0	0,0039

Fonte: Autoria Própria (2020)

Tabela AP3 – Fasores Pós-falta Utilizando Os Métodos AFMC, FCOS, FCSM, AGKC E MIMIC para o Cenário 2 de Simulação

Fasor Pós-Falta (3º Ciclo)	SELF3Ø (AFMC)	SELF3Ø (FCOS)	SELF3Ø (FCSM)
<i>VSA</i>	$1,913 \cdot 10^5 \angle -164,3^\circ$	$1,913 \cdot 10^5 \angle -74,3^\circ$	$1,912 \cdot 10^5 \angle -14,29^\circ$
<i>VSB</i>	$1,649 \cdot 10^5 \angle 71,16^\circ$	$1,649 \cdot 10^5 \angle 161,2^\circ$	$1,649 \cdot 10^5 \angle 110,2^\circ$
<i>VSC</i>	$1,674 \cdot 10^5 \angle -38,57^\circ$	$1,674 \cdot 10^5 \angle 51,44^\circ$	$1,674 \cdot 10^5 \angle -140^\circ$
<i>ISA</i>	$291,1 \angle -160,5^\circ$	$291,1 \angle -70,56^\circ$	$291,1 \angle -18,05^\circ$
<i>ISB</i>	$2957 \angle 23,15^\circ$	$2981 \angle 116,1^\circ$	$2986 \angle 155,1^\circ$
<i>ISC</i>	$2667 \angle -156,4^\circ$	$2692 \angle -63,16^\circ$	$2697 \angle -25,66^\circ$
<i>VRA</i>	$1,851 \cdot 10^5 \angle -172,5^\circ$	$1,851 \cdot 10^5 \angle -82,47^\circ$	$1,851 \cdot 10^5 \angle -6,117^\circ$
<i>VRB</i>	$1,612 \cdot 10^5 \angle 61,57^\circ$	$1,612 \cdot 10^5 \angle 151,6^\circ$	$1,612 \cdot 10^5 \angle 119,8^\circ$
<i>VRC</i>	$1,588 \cdot 10^5 \angle -47,76^\circ$	$1,588 \cdot 10^5 \angle -42,25^\circ$	$1,588 \cdot 10^5 \angle -130,9^\circ$
<i>IRA</i>	$296,5 \angle -1,774^\circ$	$296,5 \angle 88,24^\circ$	$296,5 \angle -176,8^\circ$
<i>IRB</i>	$2586 \angle 13,97^\circ$	$2586 \angle 107,4^\circ$	$2589 \angle 163,7^\circ$
<i>IRC</i>	$2873 \angle -167,6^\circ$	$2867 \angle -74,53^\circ$	$2871 \angle -14,3^\circ$
Fasor Pós-Falta (3º Ciclo)	SELF3Ø (AGKC)	SELF3Ø (MIMIC)	
<i>VSA</i>	$1,913 \cdot 10^5 \angle 15,7^\circ$	$1,913 \cdot 10^5 \angle 95,03^\circ$	
<i>VSB</i>	$1,648 \cdot 10^5 \angle -108,8^\circ$	$1,649 \cdot 10^5 \angle -29,5^\circ$	
<i>VSC</i>	$1,673 \cdot 10^5 \angle 141,5^\circ$	$1,673 \cdot 10^5 \angle -139,2^\circ$	
<i>ISA</i>	$291,1 \angle 19,46^\circ$	$291,1 \angle 98,8^\circ$	
<i>ISB</i>	$2986 \angle -153,7^\circ$	$2998 \angle -74,30^\circ$	
<i>ISC</i>	$2698 \angle 27,08^\circ$	$2709 \angle 106,3^\circ$	
<i>VRA</i>	$1,851 \cdot 10^5 \angle 7,519^\circ$	$1,851 \cdot 10^5 \angle 86,86^\circ$	
<i>VRB</i>	$1,612 \cdot 10^5 \angle -118,4^\circ$	$1,612 \cdot 10^5 \angle -39,1^\circ$	
<i>VRC</i>	$1,588 \cdot 10^5 \angle 132,2^\circ$	$1,588 \cdot 10^5 \angle -148,4^\circ$	
<i>IRA</i>	$296,5 \angle 178,2^\circ$	$296,5 \angle -102,4^\circ$	
<i>IRB</i>	$2589 \angle -162,3^\circ$	$2601 \angle -83,01^\circ$	
<i>IRC</i>	$2871 \angle 15,72^\circ$	$2882 \angle 95,03^\circ$	

Fonte: Autoria Própria (2020)

Tabela AP4 – Índices de desempenho para a estimação do Fasor ISB para o regime pré-falta

ID - ISB (Pós-Falta)	AFCC	AFMC	FCOS	FCSM	AGKC	MIMIC
<i>ID₁</i>	2,26	57,02	0,1462	0,04481	0,04487	0,00036
<i>ID₂</i> (%)	15,19	72,73	3,093	2,154	2,154	0,1304
<i>ID₃</i> (ciclos)	1,262	1,848	0,08984	0,125	0,125	0,1602

Fonte: Autoria Própria (2020)

Tabela AP5 – Localização de Falta utilizando os métodos de Estimação AFMC, FCOS, FCSM, AGKC e MIMIC, considerando o Cenário 2 de Simulação

Localização da Falta (D)	Teórico	GHP	PRE	AJJ
AFMC – 3º Ciclo	90 km	90,03 km	89,99 km	90,72 km
FCOS – 3º Ciclo	90 km	90,01 km	90 km	90,7 km
FCSM – 3º Ciclo	90 km	83,46 km	90 km	111,8 km
AGKC – 3º Ciclo	90 km	90,02 km	90,01 km	90,73 km
MIMIC – 3º Ciclo	90 km	90,01 km	90 km	90,7 km

Fonte: Autoria Própria (2020)

APÊNDICE C

OUTROS RESULTADOS DO CENÁRIO 3

Tabela AP1 – Fasores Pré-falta Utilizando Os Métodos AFMC, FCOS, FCSM, AGKC E MIMIC para o Cenário 3 de Simulação

Fasor Pré-Falta (3º Ciclo)	SELF3Ø (AFMC)	SELF3Ø (FCOS)	SELF3Ø (FCSM)
<i>VSA</i>	$4,132 \cdot 10^5 \angle -179,6^\circ$	$4,132 \cdot 10^5 \angle -89,35^\circ$	$4,132 \cdot 10^5 \angle 0,7615^\circ$
<i>VSB</i>	$4,132 \cdot 10^5 \angle 60,64^\circ$	$4,132 \cdot 10^5 \angle 150,6^\circ$	$4,131 \cdot 10^5 \angle 120,8^\circ$
<i>VSC</i>	$4,132 \cdot 10^5 \angle -59,36^\circ$	$4,131 \cdot 10^5 \angle 30,65^\circ$	$4,131 \cdot 10^5 \angle -119,2^\circ$
<i>ISA</i>	$794,3 \angle -167^\circ$	$794,3 \angle -77,01^\circ$	$794,2 \angle -11,58^\circ$
<i>ISB</i>	$794,3 \angle 72,98^\circ$	$794,3 \angle 163^\circ$	$794,2 \angle 108,4^\circ$
<i>ISC</i>	$794,3 \angle -47,03^\circ$	$794,3 \angle 42,99^\circ$	$794,2 \angle -131,6^\circ$
<i>VRA</i>	$4,061 \cdot 10^5 \angle 172^\circ$	$4,061 \cdot 10^5 \angle -97,95^\circ$	$4,061 \cdot 10^5 \angle 9,362^\circ$
<i>VRB</i>	$4,061 \cdot 10^5 \angle 52,04^\circ$	$4,061 \cdot 10^5 \angle 142^\circ$	$4,061 \cdot 10^5 \angle 129,4^\circ$
<i>VRC</i>	$4,061 \cdot 10^5 \angle -67,96^\circ$	$4,061 \cdot 10^5 \angle 22,04^\circ$	$4,061 \cdot 10^5 \angle -110,6^\circ$
<i>IRA</i>	$816,2 \angle -24,87^\circ$	$816,1 \angle 65,14^\circ$	$816,1 \angle -153,7^\circ$
<i>IRB</i>	$816,2 \angle -144,9^\circ$	$816,2 \angle -54,86^\circ$	$816,1 \angle -33,73^\circ$
<i>IRC</i>	$816,2 \angle 95,13^\circ$	$816,1 \angle -174,9^\circ$	$816,1 \angle 86,27^\circ$
Fasor Pré-Falta (3º Ciclo)	SELF3Ø (AGKC)	SELF3Ø (MIMIC)	
<i>VSA</i>	$4,132 \cdot 10^5 \angle 0,6453^\circ$	$4,132 \cdot 10^5 \angle 86,01^\circ$	
<i>VSB</i>	$4,131 \cdot 10^5 \angle -119,4^\circ$	$4,132 \cdot 10^5 \angle -33,99^\circ$	
<i>VSC</i>	$4,132 \cdot 10^5 \angle 120,6^\circ$	$4,131 \cdot 10^5 \angle -154^\circ$	
<i>ISA</i>	$794,2 \angle 12,98^\circ$	$794,2 \angle 98,35^\circ$	
<i>ISB</i>	$794,2 \angle -107^\circ$	$794,2 \angle -21,65^\circ$	
<i>ISC</i>	$794,3 \angle 133^\circ$	$794,2 \angle -141,7^\circ$	
<i>VRA</i>	$4,061 \cdot 10^5 \angle -7,955^\circ$	$4,061 \cdot 10^5 \angle 77,41^\circ$	
<i>VRB</i>	$4,061 \cdot 10^5 \angle -128^\circ$	$4,061 \cdot 10^5 \angle -42,59^\circ$	
<i>VRC</i>	$4,061 \cdot 10^5 \angle 112^\circ$	$4,061 \cdot 10^5 \angle -162,6^\circ$	
<i>IRA</i>	$816,1 \angle 155,1^\circ$	$816,1 \angle -119,5^\circ$	
<i>IRB</i>	$816,1 \angle 35,14^\circ$	$816,1 \angle 120,5^\circ$	
<i>IRC</i>	$816,1 \angle -84,86^\circ$	$816,1 \angle 0,5021^\circ$	

Fonte: Autoria Própria (2020)

Tabela AP2 – Índices de desempenho para a estimação do Fasor ISC para o regime pré-falta

ID - ISC (Pré-Falta)	AFCC	AFMC	FCOS	FCSM	AGKC	MIMIC
<i>ID₁</i>	0,000152	0,000172	0,007365	0,2533	2,393	0,2743
<i>ID₂</i> (%)	0,03867	0,04849	1,289	16,2	33,84	17,05
<i>ID₃</i> (ciclos)	0,1992	0,543	0,007813	0,003906	0	0,003906

Fonte: Autoria Própria (2020)

Tabela AP3 – Fasores Pós-falta Utilizando Os Métodos AFMC, FCOS, FCSM, AGKC E MIMIC para o Cenário 3 de Simulação

Fasor Pós-Falta (3º Ciclo)	SELF3Ø (AFMC)	SELF3Ø (FCOS)	SELF3Ø (FCSM)
<i>VSA</i>	$3,125 \cdot 10^5 \angle -163,3^\circ$	$3,126 \cdot 10^5 \angle -73,72^\circ$	$3,131 \cdot 10^5 \angle -15,57^\circ$
<i>VSB</i>	$3,126 \cdot 10^5 \angle 76,68^\circ$	$3,126 \cdot 10^5 \angle 166,7^\circ$	$3,135 \cdot 10^5 \angle 104,7^\circ$
<i>VSC</i>	$3,126 \cdot 10^5 \angle -43,34^\circ$	$3,126 \cdot 10^5 \angle 46,68^\circ$	$3,121 \cdot 10^5 \angle -135,4^\circ$
<i>ISA</i>	$1,57 \cdot 10^4 \angle 110,4^\circ$	$1,55 \cdot 10^4 \angle -159,4^\circ$	$1,549 \cdot 10^4 \angle 70,77^\circ$
<i>ISB</i>	$1,754 \cdot 10^4 \angle -26,31^\circ$	$1,546 \cdot 10^4 \angle 80,4^\circ$	$1,545 \cdot 10^4 \angle -169,2^\circ$
<i>ISC</i>	$1,237 \cdot 10^4 \angle -145,9^\circ$	$1,543 \cdot 10^4 \angle -39,35^\circ$	$1,546 \cdot 10^4 \angle -49,35^\circ$
<i>VRA</i>	$3,678 \cdot 10^5 \angle -173,4^\circ$	$3,653 \cdot 10^5 \angle -83,41^\circ$	$3,652 \cdot 10^5 \angle -5,049^\circ$
<i>VRB</i>	$3,664 \cdot 10^5 \angle 66,49^\circ$	$3,656 \cdot 10^5 \angle 156,7^\circ$	$3,646 \cdot 10^5 \angle 114,8^\circ$
<i>VRC</i>	$3,665 \cdot 10^5 \angle -53,26^\circ$	$3,661 \cdot 10^5 \angle 36,6^\circ$	$3,659 \cdot 10^5 \angle -125,2^\circ$
<i>IRA</i>	$6032 \angle 100,9^\circ$	$5941 \angle -169,3^\circ$	$6047 \angle 80,87^\circ$
<i>IRB</i>	$7073 \angle -34,96^\circ$	$5936 \angle 70,46^\circ$	$5948 \angle -158,7^\circ$
<i>IRC</i>	$5016 \angle -158,1^\circ$	$5915 \angle -49,36^\circ$	$5963 \angle -39,76^\circ$
Fasor Pós-Falta (3º Ciclo)	SELF3Ø (AGKC)	SELF3Ø (MIMIC)	
<i>VSA</i>	$3,133 \cdot 10^5 \angle 17,09^\circ$	$3,13 \cdot 10^5 \angle 102,3^\circ$	
<i>VSB</i>	$3,138 \cdot 10^5 \angle -103,3^\circ$	$3,135 \cdot 10^5 \angle -17,91^\circ$	
<i>VSC</i>	$3,119 \cdot 10^5 \angle 136,8^\circ$	$3,12 \cdot 10^5 \angle 137,9^\circ$	
<i>ISA</i>	$1,55 \cdot 10^4 \angle -69,37^\circ$	$1,549 \cdot 10^4 \angle 16^\circ$	
<i>ISB</i>	$1,545 \cdot 10^4 \angle 170,6^\circ$	$1,55 \cdot 10^4 \angle -104^\circ$	
<i>ISC</i>	$1,546 \cdot 10^4 \angle 50,75^\circ$	$1,55 \cdot 10^4 \angle 136^\circ$	
<i>VRA</i>	$3,652 \cdot 10^5 \angle 6,441^\circ$	$3,653 \cdot 10^5 \angle 91,82^\circ$	
<i>VRB</i>	$3,646 \cdot 10^5 \angle -113,4^\circ$	$3,647 \cdot 10^5 \angle -28,02^\circ$	
<i>VRC</i>	$3,659 \cdot 10^5 \angle 126,6^\circ$	$3,659 \cdot 10^5 \angle -148^\circ$	
<i>IRA</i>	$6044 \angle -79,46^\circ$	$6048 \angle 5,987^\circ$	
<i>IRB</i>	$5947 \angle 160,2^\circ$	$5970 \angle -114,4^\circ$	
<i>IRC</i>	$5963 \angle 41,17^\circ$	$5975 \angle 126,4^\circ$	

Fonte: Autoria Própria (2020)

Tabela AP4 – Índices de desempenho para a estimação do Fasor ISC para o regime pré-falta

ID - ISB (Pós-Falta)	AFCC	AFMC	FCOS	FCSM	AGKC	MIMIC
<i>ID₁</i>	1,477	161,5	0,04497	0,009008	0,01057	0,001156
<i>ID₂</i> (%)	8,889	91,63	1,201	0,7719	0,8079	0,5655
<i>ID₃</i> (ciclos)	1,219	6,207	0,1641	0,2188	0,2188	0,2226

Fonte: Autoria Própria (2020)

Tabela AP5 – Localização de Falta utilizando os métodos de Estimação AFMC, FCOS, FCSM, AGKC e MIMIC, considerando o Cenário 3 de Simulação

Localização da Falta (D)	Teórico	GHP	PRE	AJJ
AFMC – 3º Ciclo	62,5 km	66,78 km	72,26 km	60,63 km
FCOS – 3º Ciclo	62,5 km	77,28 km	71,15 km	62,51 km
FCSM – 3º Ciclo	62,5 km	128 km	34,97 km	73,99 km
AGKC – 3º Ciclo	62,5 km	120,1 km	47,92 km	63,27 km
MIMIC – 3º Ciclo	62,5 km	169,3 km	15,94 km	63,31 km

Fonte: Autoria Própria (2020)

APÊNDICE D

OUTROS RESULTADOS DO CENÁRIO 4

Tabela AP1 – Fasores Pré-falta Utilizando Os Métodos AFMC, FCOS, FCSM, AGKC E MIMIC para o Cenário 4 de Simulação

Fasor Pré-Falta (3º Ciclo)	SELF3Ø (AFMC)	SELF3Ø (FCOS)	SELF3Ø (FCSM)
VSA	$1,146.10^5 \angle -178,4^\circ$	$1,146.10^5 \angle -88,44^\circ$	$1,146.10^5 \angle -0,1775^\circ$
VSB	$1,146.10^5 \angle 61,6^\circ$	$1,146.10^5 \angle 151,6^\circ$	$1,147.10^5 \angle 119,8^\circ$
VSC	$1,146.10^5 \angle -58,39^\circ$	$1,147.10^5 \angle 31,58^\circ$	$1,147.10^5 \angle -120,2^\circ$
ISA	$37 \angle 117,7^\circ$	$37,01 \angle -152,3^\circ$	$37,01 \angle 63,75^\circ$
ISB	$37,01 \angle -2,32^\circ$	$37,01 \angle 87,64^\circ$	$37,01 \angle -176,2^\circ$
ISC	$37 \angle -122,3^\circ$	$37 \angle -32,35^\circ$	$37,01 \angle -56,26^\circ$
VRA	$1,107.10^5 \angle 173,4^\circ$	$1,107.10^5 \angle -96,6^\circ$	$1,107.10^5 \angle 7,983^\circ$
VRB	$1,107.10^5 \angle 53,44^\circ$	$1,107.10^5 \angle 143,4^\circ$	$1,107.10^5 \angle 128^\circ$
VRC	$1,107.10^5 \angle -66,55^\circ$	$1,107.10^5 \angle 23,42^\circ$	$1,107.10^5 \angle -112^\circ$
IRA	$366,2 \angle 2,903^\circ$	$366,2 \angle 92,86^\circ$	$366,2 \angle 178,5^\circ$
IRB	$366,1 \angle -117,1^\circ$	$366,1 \angle -27,12^\circ$	$366,3 \angle -61,48^\circ$
IRC	$366,1 \angle 122,9^\circ$	$366,2 \angle -147,1^\circ$	$366,2 \angle 58,53^\circ$
VPA	$1,116.10^5 \angle -170,2^\circ$	$1,116.10^5 \angle -80,26^\circ$	$1,116.10^5 \angle -8,352^\circ$
VPB	$1,116.10^5 \angle 69,77^\circ$	$1,116.10^5 \angle 159,8^\circ$	$1,116.10^5 \angle 111,6^\circ$
VPC	$1,116.10^5 \angle -50,21^\circ$	$1,116.10^5 \angle 39,75^\circ$	$1,116.10^5 \angle -128,3^\circ$
IPA	$380,8 \angle -155,1^\circ$	$380,8 \angle -65,18^\circ$	$380,9 \angle -23,44^\circ$
IPB	$380,8 \angle 84,86^\circ$	$380,8 \angle 174,8^\circ$	$380,9 \angle 96,57^\circ$
IPC	$380,8 \angle -35,13^\circ$	$380,9 \angle 54,82^\circ$	$380,9 \angle -143,4^\circ$
Fasor Pré-Falta (3º Ciclo)	SELF3Ø (AGKC)	SELF3Ø (MIMIC)	
VSA	$1,146.10^5 \angle 1,158^\circ$	$1,146.10^5 \angle 76,87^\circ$	
VSB	$1,147.10^5 \angle -118,4^\circ$	$1,147.10^5 \angle -43,12^\circ$	
VSC	$1,147.10^5 \angle 121,6^\circ$	$1,147.10^5 \angle -163,17^\circ$	
ISA	$37,01 \angle 62,35^\circ$	$37,01 \angle 12,95^\circ$	
ISB	$37,01 \angle 177,7^\circ$	$37,01 \angle -107,1^\circ$	
ISC	$37,01 \angle 57,66^\circ$	$37,01 \angle 133^\circ$	
VRA	$1,107.10^5 \angle -6,675^\circ$	$1,107.10^5 \angle 68,71^\circ$	
VRB	$1,107.10^5 \angle -126,6^\circ$	$1,107.10^5 \angle -51,28^\circ$	
VRC	$1,107.10^5 \angle 113,4^\circ$	$1,107.10^5 \angle -171,3^\circ$	
IRA	$366,2 \angle -177,1^\circ$	$366,2 \angle -101,8^\circ$	
IRB	$366,2 \angle 62,89^\circ$	$366,2 \angle 138,2^\circ$	
IRC	$366,3 \angle -57,13^\circ$	$366,3 \angle 18,17^\circ$	
VPA	$1,116.10^5 \angle 9,766^\circ$	$1,116.10^5 \angle 85,05^\circ$	
VPB	$1,116.10^5 \angle -110,2^\circ$	$1,116.10^5 \angle -34,95^\circ$	
VPC	$1,116.10^5 \angle 129,7^\circ$	$1,116.10^5 \angle -155^\circ$	
IPA	$380,9 \angle 24,84^\circ$	$380,8 \angle 100,1^\circ$	
IPB	$380,9 \angle -95,16^\circ$	$380,9 \angle -19,87^\circ$	
IPC	$380,9 \angle 144,8^\circ$	$380,9 \angle -139,9^\circ$	

Fonte: Autoria Própria (2020)

Tabela AP2 – Índices de desempenho para a estimação do Fasor ISC para o regime pré-falta

ID - ISC (Pré-Falta)	AFCC	AFMC	FCOS	FCSM	AGKC	MIMIC
ID_1	$3,002.10^{-5}$	$3,115.10^{-5}$	0,000147	0,00029	0,000308	0,00027
ID_2 (%)	0,01576	0,01665	0,03467	0,04076	0,05357	0,03901
ID_3 (ciclos)	0,05469	0,5313	0,2031	0,0039	0	0,0039

Fonte: Autoria Própria (2020)

Tabela AP3 – Fasores Pós-falta Utilizando Os Métodos AFMC, FCOS, FCSM, AGKC E MIMIC para o Cenário 4 de Simulação

Fasor Pós-Falta (3º Ciclo)	SELF3Ø (AFMC)	SELF3Ø (FCOS)	SELF3Ø (FCSM)
VSA	$1,173.10^5 \angle -167,6^\circ$	$1,172.10^5 \angle -77,63^\circ$	$1,171.10^5 \angle -10,85^\circ$
VSB	$1,165.10^5 \angle 76,14^\circ$	$1,166.10^5 \angle 166,1^\circ$	$1,169.10^5 \angle 105,3^\circ$
VSC	$1,054.10^5 \angle -46,33^\circ$	$1,054.10^5 \angle 43,68^\circ$	$1,054.10^5 \angle -132,3^\circ$
ISA	$36,34 \angle 133,6^\circ$	$36,81 \angle -136^\circ$	$37,77 \angle 48,82^\circ$
ISB	$35,59 \angle 7,556^\circ$	$35,09 \angle 97,83^\circ$	$35,29 \angle 171,4^\circ$
ISC	$545,5 \angle -116^\circ$	$548,4 \angle -25,59^\circ$	$546,9 \angle -62,94^\circ$
VRA	$1,138.10^5 \angle -175,6^\circ$	$1,137.10^5 \angle -85,65^\circ$	$1,137.10^5 \angle -2,831^\circ$
VRB	$1,12.10^5 \angle 68,17^\circ$	$1,12.10^5 \angle 158,1^\circ$	$1,123.10^5 \angle 113,2^\circ$
VRC	$1,017.10^5 \angle -55,24^\circ$	$1,017.10^5 \angle 34,78^\circ$	$1,017.10^5 \angle -123,4^\circ$
IRA	$364,6 \angle 15,23^\circ$	$364,1 \angle 105,2^\circ$	$364,5 \angle 166^\circ$
IRB	$368,2 \angle -104,6^\circ$	$368,3 \angle -14,73^\circ$	$367,1 \angle -73,81^\circ$
IRC	$526,6 \angle -157,8^\circ$	$525,9 \angle -67,32^\circ$	$525,3 \angle -21,12^\circ$
VPA	$1,252.10^5 \angle -167,7^\circ$	$1,252.10^5 \angle -77,78^\circ$	$1,251.10^5 \angle -10,75^\circ$
VPB	$1,265.10^5 \angle 91,91^\circ$	$1,265.10^5 \angle -178,1^\circ$	$1,268.10^5 \angle 89,51^\circ$
VPC	$5,906.10^4 \angle -35,79^\circ$	$5,908.10^4 \angle 54,17^\circ$	$5,877.10^4 \angle -143,2^\circ$
IPA	$384,4 \angle -142,4^\circ$	$384,7 \angle -52,48^\circ$	$384,8 \angle -36,13^\circ$
IPB	$377,9 \angle 97,11^\circ$	$378,1 \angle -172,1^\circ$	$378,2 \angle 83,55^\circ$
IPC	$2897 \angle -108,7^\circ$	$2916 \angle -18,33^\circ$	$2923 \angle -70,3^\circ$
Fasor Pré-Falta (3º Ciclo)	SELF3Ø (AGKC)	SELF3Ø (MIMIC)	
VSA	$1,171.10^5 \angle 12,21^\circ$	$1,172.10^5 \angle 87,55^\circ$	
VSB	$1,17.10^5 \angle -103,9^\circ$	$1,168.10^5 \angle -28,53^\circ$	
VSC	$1,053.10^5 \angle 133,7^\circ$	$1,054.10^5 \angle -151^\circ$	
ISA	$37,67 \angle -47,27^\circ$	$37,94 \angle 28,36^\circ$	
ISB	$35,27 \angle -170,15^\circ$	$34,93 \angle -94,78^\circ$	
ISC	$546,8 \angle 64,34^\circ$	$547,9 \angle 139,5^\circ$	
VRA	$1,137.10^5 \angle 4,199^\circ$	$1,138.10^5 \angle 79,53^\circ$	
VRB	$1,124.10^5 \angle -111,8^\circ$	$1,123.10^5 \angle -36,48^\circ$	
VRC	$1,016.10^5 \angle 124,8^\circ$	$1,017.10^5 \angle -159,9^\circ$	
IRA	$364,4 \angle -164,6^\circ$	$364,1 \angle -89,26^\circ$	
IRB	$367,3 \angle 75,22^\circ$	$367,3 \angle 150,5^\circ$	
IRC	$525,3 \angle 22,51^\circ$	$526,8 \angle 97,79^\circ$	
VPA	$1,252.10^5 \angle 12,17^\circ$	$1,252.10^5 \angle 87,44^\circ$	
VPB	$1,267.10^5 \angle -88,11^\circ$	$1,267.10^5 \angle -12,79^\circ$	
VPC	$5,875.10^4 \angle 144,6^\circ$	$5,87.10^4 \angle -140,2^\circ$	
IPA	$384,8 \angle 37,52^\circ$	$384,8 \angle 112,8^\circ$	

<i>IPB</i>	378,3 $\angle$ – 82,15°	378,2 $\angle$ – 6,847°	
<i>IPC</i>	2923 $\angle$ 71,71°	2925 $\angle$ 146,9°	

Fonte: Autoria Própria (2020)

Tabela AP4 – Índices de desempenho para a estimação do Fasor ISC para o regime pós-falta

ID - ISC (Pós-Falta)	AFCC	AFMC	FCOS	FCSM	AGKC	MIMIC
<i>ID</i>₁	1,127	17,19	0,07207	0,2088	0,6815	0,1622
<i>ID</i>₂ (%)	11,74	43,87	3,181	3,49	4,957	2,774
<i>ID</i>₃ (ciclos)	0,6641	0,7578	0,1367	0,04297	0,1484	0,2383

Fonte: Autoria Própria (2020)

APÊNDICE E

OUTROS RESULTADOS DO CENÁRIO 5

Tabela AP1 – Fasores Pré-falta Utilizando Os Métodos AFMC, FCOS, FCSM, AGKC E MIMIC para o Cenário 5 de Simulação

Fasor Pré-Falta (3º Ciclo)	SELF3Ø (AFMC)	SELF3Ø (FCOS)	SELF3Ø (FCSM)
VSA	$1,923.10^5 \angle -178,7^\circ$	$1,923.10^5 \angle -88,71^\circ$	$1,923.10^5 \angle 0,1262^\circ$
VSB	$1,923.10^5 \angle 61,28^\circ$	$1,923.10^5 \angle 151,3^\circ$	$1,922.10^5 \angle 120,1^\circ$
VSC	$1,923.10^5 \angle -58,73^\circ$	$1,923.10^5 \angle 31,28^\circ$	$1,923.10^5 \angle -119,9^\circ$
ISA	$64,61 \angle -97,42^\circ$	$64,61 \angle -7,411^\circ$	$64,6 \angle -81,18^\circ$
ISB	$64,61 \angle 142,6^\circ$	$64,61 \angle -127,4^\circ$	$64,6 \angle 38,82^\circ$
ISC	$64,61 \angle 22,58^\circ$	$64,61 \angle 112,6^\circ$	$64,6 \angle 158,8^\circ$
VRA	$1,886.10^5 \angle 172,3^\circ$	$1,886.10^5 \angle -97,69^\circ$	$1,886.10^5 \angle 9,027^\circ$
VRB	$1,886.10^5 \angle 52,3^\circ$	$1,886.10^5 \angle 142,3^\circ$	$1,886.10^5 \angle 129,1^\circ$
VRC	$1,886.10^5 \angle -67,7^\circ$	$1,886.10^5 \angle 22,31^\circ$	$1,886.10^5 \angle -110,9^\circ$
IRA	$309,1 \angle -11,93^\circ$	$309,1 \angle 78,08^\circ$	$309,1 \angle -166,7^\circ$
IRB	$309,2 \angle 131,9^\circ$	$309,2 \angle -41,92^\circ$	$309,1 \angle -46,66^\circ$
IRC	$309,2 \angle 108,1^\circ$	$309,2 \angle -161,9^\circ$	$309,1 \angle 73,33^\circ$
VPA	$1,869.10^5 \angle -169,8^\circ$	$1,869.10^5 \angle -79,75^\circ$	$1,869.10^5 \angle -8,835^\circ$
VPB	$1,869.10^5 \angle 70,24^\circ$	$1,869.10^5 \angle 160,2^\circ$	$1,869.10^5 \angle 111,2^\circ$
VPC	$1,869.10^5 \angle -49,77^\circ$	$1,869.10^5 \angle 40,24^\circ$	$1,869.10^5 \angle -128,8^\circ$
IPA	$351,6 \angle -145^\circ$	$351,6 \angle -55,02^\circ$	$351,6 \angle -33,57^\circ$
IPB	$351,7 \angle 94,97^\circ$	$351,7 \angle -175^\circ$	$351,6 \angle 86,43^\circ$
IPC	$351,6 \angle -25,03^\circ$	$351,6 \angle 64,99^\circ$	$351,6 \angle -153,6^\circ$
Fasor Pré-Falta (3º Ciclo)	SELF3Ø (AGKC)	SELF3Ø (MIMIC)	
VSA	$1,923.10^5 \angle 1,126^\circ$	$1,923.10^5 \angle 80,62^\circ$	
VSB	$1,922.10^5 \angle -118,7^\circ$	$1,922.10^5 \angle -39,38^\circ$	
VSC	$1,923.10^5 \angle 121,3^\circ$	$1,922.10^5 \angle -159,4^\circ$	
ISA	$64,6 \angle 82,59^\circ$	$64,6 \angle 161,9^\circ$	
ISB	$64,6 \angle -37,41^\circ$	$64,6 \angle 41,93^\circ$	
ISC	$64,6 \angle -157,4^\circ$	$64,61 \angle -78,07^\circ$	
VRA	$1,886.10^5 \angle -7,696^\circ$	$1,886.10^5 \angle 71,65^\circ$	
VRB	$1,886.10^5 \angle -127,7^\circ$	$1,886.10^5 \angle -48,35^\circ$	
VRC	$1,886.10^5 \angle 112,3^\circ$	$1,886.10^5 \angle -168,4^\circ$	
IRA	$309,2 \angle 168,1^\circ$	$309,1 \angle -112,6^\circ$	
IRB	$309,1 \angle 48,07^\circ$	$309,1 \angle 127,4^\circ$	
IRC	$309,1 \angle -71,92^\circ$	$309,1 \angle 7,413^\circ$	
VPA	$1,869.10^5 \angle 10,24^\circ$	$1,869.10^5 \angle 89,58^\circ$	
VPB	$1,869.10^5 \angle -109,8^\circ$	$1,869.10^5 \angle -30,42^\circ$	
VPC	$1,869.10^5 \angle 130,2^\circ$	$1,869.10^5 \angle -150,4^\circ$	
IPA	$351,6 \angle 34,98^\circ$	$351,6 \angle 114,3^\circ$	
IPB	$351,6 \angle -85,02^\circ$	$351,6 \angle -5,68^\circ$	
IPC	$351,6 \angle 155^\circ$	$351,6 \angle -125,7^\circ$	

Fonte: Autoria Própria (2020)

Tabela AP2 – Índices de desempenho para a estimação do Fasor ISB para o regime pré-falta

ID - ISB (Pré-Falta)	AFCC	AFMC	FCOS	FCSM	AGKC	MIMIC
ID_1	0	0	0,1902	0,452	3,634	0,5219
ID_2 (%)	-0,6038	-0,6038	1,22	16,08	35,4	18,46
ID_3 (ciclos)	0,06641	0,5234	0,01172	0,003906	0	0,003906

Fonte: Autoria Própria (2020)

Tabela AP3 – Fasores Pós-falta Utilizando Os Métodos AFMC, FCOS, FCSM, AGKC E MIMIC para o Cenário 5 de Simulação

Fasor Pós-Falta (3º Ciclo)	SELF3Ø (AFMC)	SELF3Ø (FCOS)	SELF3Ø (FCSM)
<i>VSA</i>	$1,818 \cdot 10^5 \angle -162,5^\circ$	$1,818 \cdot 10^5 \angle -72,57^\circ$	$1,818 \cdot 10^5 \angle -16,03^\circ$
<i>VSB</i>	$1,825 \cdot 10^5 \angle 81,85^\circ$	$1,824 \cdot 10^5 \angle 171,1^\circ$	$1,824 \cdot 10^5 \angle 100,3^\circ$
<i>VSC</i>	$1,923 \cdot 10^5 \angle -40,86^\circ$	$1,922 \cdot 10^5 \angle 49,15^\circ$	$1,922 \cdot 10^5 \angle -137,7^\circ$
<i>ISA</i>	$1095 \angle 147,4^\circ$	$1068 \angle -121,3^\circ$	$1069 \angle 32,85^\circ$
<i>ISB</i>	$1078 \angle -35,9^\circ$	$1050 \angle 55,31^\circ$	$1051 \angle -143,8^\circ$
<i>ISC</i>	$64,61 \angle 40,45^\circ$	$64,61 \angle 130,5^\circ$	$64,6 \angle 141^\circ$
<i>VRA</i>	$1,719 \cdot 10^5 \angle -174,1^\circ$	$1,715 \cdot 10^5 \angle -84,15^\circ$	$1,715 \cdot 10^5 \angle -4,30^\circ$
<i>VRB</i>	$1,691 \cdot 10^5 \angle 73,04^\circ$	$1,688 \cdot 10^5 \angle 163,1^\circ$	$1,684 \cdot 10^5 \angle 108,3^\circ$
<i>VRC</i>	$1,886 \cdot 10^5 \angle -49,83^\circ$	$1,886 \cdot 10^5 \angle 40,18^\circ$	$1,886 \cdot 10^5 \angle -128,8^\circ$
<i>IRA</i>	$1884 \angle 139^\circ$	$1825 \angle -129,8^\circ$	$1832 \angle 41,49^\circ$
<i>IRB</i>	$2186 \angle -42,85^\circ$	$2126 \angle 48,12^\circ$	$2133 \angle -136,5^\circ$
<i>IRC</i>	$309,2 \angle 125,9^\circ$	$309,1 \angle -144,1^\circ$	$309,1 \angle 55,47^\circ$
<i>VPA</i>	$1,757 \cdot 10^5 \angle -153,1^\circ$	$1,757 \cdot 10^5 \angle -63,11^\circ$	$1,757 \cdot 10^5 \angle -25,48^\circ$
<i>VPB</i>	$1,783 \cdot 10^5 \angle 90,63^\circ$	$1,782 \cdot 10^5 \angle -179,4^\circ$	$1,782 \cdot 10^5 \angle 90,78^\circ$
<i>VPC</i>	$1,869 \cdot 10^4 \angle -31,9^\circ$	$1,869 \cdot 10^4 \angle 58,11^\circ$	$1,869 \cdot 10^4 \angle -146,7^\circ$
<i>IPA</i>	$1205 \angle 162^\circ$	$1186 \angle -106,6^\circ$	$1186 \angle 18,11^\circ$
<i>IPB</i>	$862,7 \angle -22,45^\circ$	$840,9 \angle 69,47^\circ$	$841,7 \angle -157,9^\circ$
<i>IPC</i>	$351,6 \angle -7,16^\circ$	$351,6 \angle 82,85^\circ$	$351,6 \angle -171,4^\circ$
Fasor Pré-Falta (3º Ciclo)	SELF3Ø (AGKC)	SELF3Ø (MIMIC)	
<i>VSA</i>	$1,819 \cdot 10^5 \angle 17,45^\circ$	$1,819 \cdot 10^5 \angle 96,77^\circ$	
<i>VSB</i>	$1,824 \cdot 10^5 \angle -98,85^\circ$	$1,824 \cdot 10^5 \angle -19,52^\circ$	
<i>VSC</i>	$1,922 \cdot 10^5 \angle 139,2^\circ$	$1,922 \cdot 10^5 \angle -141,5^\circ$	
<i>ISA</i>	$1069 \angle -31,42^\circ$	$1072 \angle 48,04^\circ$	
<i>ISB</i>	$1051 \angle 145,2^\circ$	$1054 \angle -135,3^\circ$	
<i>ISC</i>	$64,6 \angle -139,5^\circ$	$64,6 \angle -60,21^\circ$	
<i>VRA</i>	$1,714 \cdot 10^5 \angle 5,592^\circ$	$1,716 \cdot 10^5 \angle 85,05^\circ$	
<i>VRB</i>	$1,681 \cdot 10^5 \angle -106,9^\circ$	$1,685 \cdot 10^5 \angle -27,59^\circ$	
<i>VRC</i>	$1,886 \cdot 10^5 \angle 130,2^\circ$	$1,886 \cdot 10^5 \angle -150,5^\circ$	
<i>IRA</i>	$1831 \angle -40,05^\circ$	$1837 \angle 39,45^\circ$	
<i>IRB</i>	$2133 \angle 137,9^\circ$	$2138 \angle -142,6^\circ$	
<i>IRC</i>	$309,1 \angle -54,06^\circ$	$309,1 \angle 25,28^\circ$	
<i>VPA</i>	$1,757 \cdot 10^5 \angle 26,9^\circ$	$1,757 \cdot 10^5 \angle 106,2^\circ$	
<i>VPB</i>	$1,782 \cdot 10^5 \angle -89,37^\circ$	$1,782 \cdot 10^5 \angle -10,04^\circ$	
<i>VPC</i>	$1,869 \cdot 10^4 \angle 148,1^\circ$	$1,869 \cdot 10^4 \angle -132,6^\circ$	
<i>IPA</i>	$1186 \angle -16,7^\circ$	$1190 \angle 62,72^\circ$	

<i>IPB</i>	841,7 $\angle$ 159,3°	845,1 $\angle$ – 121,2°
<i>IPC</i>	351,6 $\angle$ 172,9°	351,6 $\angle$ – 107,8°

Fonte: Autoria Própria (2020)

Tabela AP4 – Índices de desempenho para a estimação do Fasor ISB para o regime pós-falta

ID - ISB (Pós-Falta)	AFCC	AFMC	FCOS	FCSM	AGKC	MIMIC
<i>ID</i>₁	0,7038	16,85	0,02983	0,1119	0,183	0,07307
<i>ID</i>₂ (%)	8,577	40,45	2,036	3,421	6,22	3,794
<i>ID</i>₃ (ciclos)	0,5234	1,496	0,05859	0,07031	0	0,07422

Fonte: Autoria Própria (2020)