



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação

Dennis Fernando Jimenez Figueroa

# **Novo Método para a Classificação de Falhas em Linhas de Transmissão de Meio Comprimento de Onda**

Campinas

2022



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação

Dennis Fernando Jimenez Figueroa

## **Novo Método para a Classificação de Falhas em Linhas de Transmissão de Meio Comprimento de Onda**

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica, na área de Energia Elétrica.

Orientadora: Profa. Dra. Maria Cristina Dias Tavares

Co-orientador: Prof. Dr. Ozenir Farah da Rocha Dias

Este exemplar corresponde à versão final da tese defendida pelo aluno Dennis Fernando Jimenez Figueroa, e orientada pelo Profa. Dra. Maria Cristina Dias Tavares.

---

Campinas

2022

Ficha catalográfica  
Universidade Estadual de Campinas  
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura  
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

J564n Jimenez Figueroa, Dennis Fernando, 1960-  
Novo método para classificação de faltas em linhas de transmissão de meio comprimento de onda / Dennis Fernando Jimenez Figueroa. – Campinas, SP : [s.n.], 2022.

Orientador: Maria Cristina Dias Tavares.  
Coorientador: Ozenir Farah da Rocha Dias.  
Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

1. Energia elétrica - Transmissão. 2. Algoritmos. 3. Curtos-circuitos. 4. Corrente alternada. 5. Sistemas de potência. I. Tavares, Maria Cristina Dias, 1962-. II. Dias, Ozenir Farah da Rocha, 1988-. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. IV. Título.

### Informações Complementares

**Título em outro idioma:** New method for classification faults in half-wavelength transmission lines

**Palavras-chave em inglês:**

Electric energy - Transmission

Algorithms

Short-circuit

Alternating current

Algorithm

Power systems

**Área de concentração:** Energia Elétrica

**Titulação:** Doutor em Engenharia Elétrica

**Banca examinadora:**

Maria Cristina Dias Tavares [Orientador]

Mário Oleskovicz

Felipe Vigolvino Lopes

Flavio Bezerra Costa

Javier Arturo Santiago Ortega

**Data de defesa:** 08-09-2022

**Programa de Pós-Graduação:** Engenharia Elétrica

**Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)**

- ORCID do autor: <https://orcid.org/0000-0002-6977-8158>

- Currículo Lattes do autor: <http://lattes.cnpq.br/7411852603481684>

## **COMISSÃO JULGADORA – TESE DE DOUTORADO**

**Candidato:** Dennis Fernando Jimenez Figueroa RA: 209434

**Data da Defesa:** 08 de setembro de 2022

**Título da Tese:** “Novo Método para a Classificação de Faltas em Linhas de Transmissão de Meio Comprimento de Onda.”

Profa. Dra. Maria Cristina Dias Tavares (Presidente)

Prof. Dr. Mário Oleskovicz

Prof. Dr. Felipe Vigolvino Lopes

Prof. Dr. Flavio Bezerra Costa

Prof. Dr. Javier Arturo Santiago Ortega

A ata de defesa, com as respectivas assinaturas dos membros da Comissão Julgadora, encontra-se no SIGA (Sistema de Fluxo de Dissertação/Tese) e na Secretaria de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

*Dedico esta trabalho a meus pais Máximo e Guillermina (in memoriam), pois com seu amor e dedicação formaram um bom homem.*

*À minha esposa Vielka, minhas filhas Denise e Paola, e meu neto Dennis, por seu amor, apoio e compreensão, pela sua coragem e espera paciente pelo esposo, pai e vovô ausente. Eles impulsionam meu aprimoramento.*

# Agradecimentos

Agradeço a Deus por me dar a vida e, com ela, a capacidade, a confiança e a perseverança suficiente para o desenvolvimento e conclusão deste trabalho, sem Ele não teria sido possível.

Ao governo do Panamá, através da Secretaria Nacional de Ciência e Tecnologia (SE-NACYT) e do Instituto para a Formação y Aproveitamento de Recursos Humanos (IFARHU) por me permitir a oportunidade de fortalecer e atualizar meus conhecimentos. Sem esse apoio, atingir meus objetivos teria sido mais difícil.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - quem através do processo N° **88887.641964/2021-00**, colaborou diretamente para o desenvolvimento do trabalho de pesquisa. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

A minha professora e orientadora, Dra. Maria Cristina Dias Tavares, por transmitir os conhecimentos essenciais para o desenvolvimento deste projeto, pelo seu apoio e orientação.

A meu co-orientador, Dr. Ozenir Dias, pelo seu apoio e orientação.

Aos meus colegas e amigos, engenheiros do Laboratório de Transitórios e Proteção, pelo valioso apoio e colaboração durante o período de tempo que compartilhamos juntos, na busca pelo conhecimento.

Agradecimentos especiais a meus pais Máximo e Guillermina *in memoriam* pois com seu amor e dedicação formaram um bom homem.

À minha esposa Vielka e minhas filhas Denise e Paola, por seu amor, apoio e compreensão, pela sua coragem e espera paciente pelo esposo e pai ausente. Elas impulsionam meu aprimoramento.

Por fim, quero agradecer a todas aquelas pessoas entre familiares, amigos e colegas que de uma forma ou de outra me deram seu apoio e carinho.

# Resumo

Apresenta-se neste trabalho um novo algoritmo para a classificação de falha em linhas de transmissão em corrente alternada de muito longo comprimento, especificamente as linhas de meio comprimento de onda. O método utiliza as taxas de variação das magnitudes das componentes de Clarke dos fasores de correntes nos terminais da linha, sendo o sistema de teste implementado no *Simulador Digital em Tempo Real (RTDS)*. Diferentes tipos de defeitos foram aplicados a cada 5% do comprimento da linha. O algoritmo proposto é imune ao comportamento atípico da linha de meio comprimento de onda, incluindo as zonas de ressonância. Além disso, o algoritmo é imune ao ângulo de incidência da falta, à resistência de falta e ao fluxo de carga da linha. Por fim, o algoritmo de classificação de falha pode ser implementado de maneira simples em relés microprocessados comerciais ou em algoritmos para análise pós-falta.

**Palavras-chaves:** Linha de Transmissão Longa, Meio Comprimento de Onda, Componentes de Clarke, Seletor de Fases, Classificação de Falta, Proteção Fasorial.

# Abstract

The present document introduces a new algorithm for fault type classification for very long transmission lines, namely the half-wavelength transmission lines. The method uses the variation rate of the Clarke components' currents phasors and was implemented in a Real Time Digital Simulator (RTDS) environment. Different types of fault were applied at each 5% of the line length. The proposed algorithm is immune to the native behavior of the half-wavelength line, including the resonance zones and their mitigation procedures. In addition, the algorithm is immune to the fault inception angle, fault resistance, and the line loading level. The fault classification algorithm can be implemented in a simple way in commercial microprocessor-based relays or in algorithms for post-fault analysis procedure.

**Keywords:** Long Transmission Line, Half-Wavelength, Clarke Components, Phase Selector, Fault Classification, Fault Location, Phasor Protection.

*"Nunca considere estudar como uma obrigação, mas como uma oportunidade de penetrar no  
belo e maravilhoso mundo do conhecimento."  
(Albert Einstein)*

# Lista de ilustrações

Figura 1.1 – Consumo de Energia, ano 2020 - 2030. . . . .	16
Figura 1.2 – Mapa do Sistema de Transmissão–Horizonte 2024. . . . .	17
Figura 2.1 – Histórico dos estudos da TMO. . . . .	24
Figura 2.2 – Perfil de tensão ao longo de uma linha, 800 kV, 2600 km, para diferentes níveis de carregamento com fator de potência unitário. . . . .	28
Figura 2.3 – Sobretensões para faltas trifásicas ao longo da linha TMO - Medido no terminal Emissor - Carregamento de 1,0 SIL. Sem método de mitigação. . . . .	29
Figura 2.4 – Principais componentes de um sistema LCC-HVDC (CIGRE, 2012). . . . .	30
Figura 2.5 – Diagrama de blocos básico para relé microprocessado (BONETTI <i>et al.</i> , 2016). . . . .	33
Figura 2.6 – Técnicas de classificação de faltas. . . . .	34
Figura 3.1 – Sistema de Teste. . . . .	41
Figura 3.2 – Sistema de Teste - HIL. . . . .	46
Figura 3.3 – Sistema de Teste no Modulo Runtime. . . . .	47
Figura 3.4 – Caixa de Teste . . . . .	47
Figura 3.5 – Padrão IEEE para intercâmbio de dados transitórios. . . . .	49
Figura 4.1 – Falta Monofásica. . . . .	51
Figura 4.2 – Falta bifásica. . . . .	52
Figura 4.3 – Falta bifásica. . . . .	52
Figura 4.4 – Falta bifásica. . . . .	53
Figura 4.5 – Seletor Fases. . . . .	54
Figura 4.6 – Falta Monofásica. . . . .	57
Figura 5.1 – Sinais de Correntes para Falta A-G a 25, 50, 75, e 98% do Extremo de envio . . . . .	58
Figura 5.2 – Lugar da Impedância Falta A-G a 25% vista do extremo de envio . . . . .	59
Figura 5.3 – Componentes Betas, Falta A-G a 25, 50, 75, e 95% vista do extremo receptor . . . . .	60
Figura 5.4 – Componentes Beta, Falta A-G a 25, 50, 75 e 98% vista do extremo de envio . . . . .	61
Figura 5.5 – Componentes Alfa, Falta A-G a 25, 50, 75 e 98% vista do extremo de envio . . . . .	62
Figura 5.6 – Taxa de variação Falta A-G a 25, 50, 75, e 98% vista do extremo de envio . . . . .	62
Figura 5.7 – Taxa de variação Falta A-G a 25, 50, 75, e 98% vista do extremo de envio . . . . .	63
Figura 5.8 – Componentes Betas, Falta A-G a 15, 35, 60, e 85% vista do extremo de envio . . . . .	64
Figura 5.9 – Componentes Betas, Falta B-G a 15, 35, 60, e 85% vista do extremo de envio . . . . .	64
Figura 5.10–Componentes Betas, Falta C-G a 15, 35, 60, e 85% vista do extremo de envio . . . . .	65
Figura 5.11–Componentes Alfa, Falta BC vista do extremo de envio . . . . .	65
Figura 5.12–Componentes Beta, Falta BC vista do extremo de envio . . . . .	66
Figura 5.13–Derivadas Componentes Alfa, Falta BC vista do extremo de envio . . . . .	67

Figura 5.14–Derivadas Componentes Beta, Falta BC vista do extremo de envio . . . . .	67
Figura 5.15–Componentes Alfa Falta BCG a 25, 50, 75, e 98% vista do extremo de envio	68
Figura 5.16–Componentes Alfa Falta BC-G a 25, 50, 75, e 98% vista do extremo de envio	69
Figura 5.17–Derivadas componentes Alfa Falta BCG a 25, 50, 75, e 98% vista do extremo de envio . . . . .	69
Figura 5.18–Derivadas componentes Beta Falta BC-G a 25, 50, 75, e 98% vista do extremo de envio . . . . .	70
Figura 5.19–Componentes de Clarke, Falta ABC a 25, 50, 75, e 98% vista do extremo de envio . . . . .	71
Figura 5.20–Componentes de Clarke, Falta ABC a 25, 50, 75, e 98% vista do extremo de envio . . . . .	71
Figura 5.21–Derivada Componentes Clarke, Falta ABC a 25, 50, 75, e 98% vista do extremo de envio . . . . .	72
Figura 5.22–Derivada Componentes Clarke, Falta ABC a 25, 50, 75, e 98% vista do extremo de envio . . . . .	73
Figura 5.23–Comportamento Transitório TMO, Energização e Religamento vista do extremo de envio . . . . .	74
Figura 5.24–Resposta de Tempo para Testes de Faltas A-G com 1.0 SIL . . . . .	75
Figura 5.25–Resposta de Tempo para Testes de Faltas BC e ABC com 1.0 SIL . . . . .	75
Figura 5.26–Resposta Tempo meio para Testes de Faltas AG e BC com 1.0 SIL . . . . .	76
Figura 5.27–Desempenho Estatístico, Algoritmo Seletor de Fases, Faltas A-G . . . . .	77
Figura 5.28–Desempenho do Algoritmo Seletor de Fases, Faltas BC na TMO, vista desde o terminal de envio . . . . .	77
Figura 5.29–Desempenho do Algoritmo Seletor de Fases, vista desde o terminal de envio	78
Figura 5.30–Desempenho do Algoritmo Seletor de Fases, Falta ABC no SEL-421, vista desde o terminal de envio, sem bloqueio . . . . .	80
Figura 5.31–Desempenho do Algoritmo Seletor de Fases, Falta ABC no SEL-421, vista desde o terminal de envio, com bloqueio . . . . .	81
Figura 5.32–Desempenho do Algoritmo Seletor de Fases, Falta ABC no SEL-421, vista desde o terminal de envio . . . . .	81

# Lista de tabelas

Tabela 2.1 – Relações entre as Componentes de Clarke para Faltas em Sistemas Trifásicos	39
Tabela 3.1 – Parâmetros da Linha TMO - 60 Hz. . . . .	41
Tabela 3.2 – Parâmetros dos Elementos. . . . .	41
Tabela 3.3 – Elementos Supresores. . . . .	42
Tabela 3.4 – Valores Nominiais da Linha TMO. . . . .	42
Tabela 3.5 – Ajustes dos Relés. . . . .	45
Tabela 4.1 – Componentes de Clarke . . . . .	54
Tabela 4.2 – Relações entre as magnitudes das Componentes de Clarke dos fasores de corrente para Classificar as Faltas em Sistemas Trifásicos com Carga . . . . .	56
Tabela 5.1 – Tempo Médio. . . . .	78
Tabela 5.2 – Sinais do Relé. . . . .	79
Tabela 5.3 – Modelo de Classificação . . . . .	83

# Lista de Acrônimos e Abreviações

$\alpha$ ;  $\beta$ ; 0: Componentes de Clarke (alfa, beta e zero)

$A - G$ ;  $B - G$ ;  $C - G$ : Faltas de Fase a Terra (monofásicas)

$AB - G$ ;  $BC - G$ ;  $CA - G$ : Faltas entre duas fases e Terra (Bifásicas a terra)

$AB$ ;  $BC$ ;  $CA$ : Faltas entre fases (bifásicas)

$ABC$ : Falta Trifásica

$CA$ : Corrente Alternada

$CC$ : Corrente Contínua

$EPE$ : Empresa de Pesquisa Energética

$HVAC$ : Alta Tensão em Corrente Alternada

$HVDC$ : Alta Tensão em Corrente Contínua

$LCC$ : Conversores Comutados em Linha

$ONS$ : Operador Nacional do Sistema

$RSCAD$ : Software de Simulação em Tempo Real

$RTDS$ : Simulador Digital em Tempo Real

$SIL$ : Potência Característica da Linha de Transmissão

$SIN$ : Sistema Interligado Nacional

$TMO$ : Linha de Transmissão em Meio Comprimento de Onda

$VSC$ : Conversores de Fontes de Tensão

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>16</b>
1.1	Motivação	16
1.2	Objetivos	20
1.2.1	Objetivo Geral	20
1.2.2	Objetivos Específicos	20
1.3	Contribuições da Pesquisa	20
1.4	Estrutura do Trabalho	21
1.5	Trabalhos Publicados	22
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>23</b>
2.1	Transmissão em Meio Comprimento de Onda	23
2.1.1	Principais Pesquisas Realizadas na TMO	24
2.2	Corrente Contínua em Alta Tensão - HVDC	29
2.2.1	Eletrônica de Potência - Conversores	30
2.2.2	Filtros	30
2.2.3	Custos	31
2.3	Sistemas de Proteção	31
2.3.1	Classificador de Fases com Falhas em Linhas Convencionais	33
2.3.2	Classificação de Fases com Falhas em Linhas TMO	35
2.4	Componentes de Clarke	37
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA E MATERIAIS</b>	<b>40</b>
3.1	Metodologia	40
3.1.1	Modelo do Sistema Teste	40
3.1.2	Algoritmo Classificador de Falta Proposto	43
3.1.2.1	Desenvolvimento do Algoritmo	43
3.1.2.2	Simulação das Falhas envolvendo uma ou mais fases no Modelo Teste	43
3.1.2.3	Avaliação do Desempenho do Algoritmo ante Falhas	44
3.1.2.4	Seletor de Fases Implementado no Relé SEL-421	44
3.1.3	Ajustes das Funções de Distância das Proteções	44
3.2	Materiais	45
3.2.1	Simulador Digital em Tempo Real - RTDS	45
3.2.2	RSCAD - RTDS	46
3.2.3	Caixas de Testes - Doble F-635e	47
3.2.4	Equipamentos de Proteção, Comunicação e Controle SEL	47

3.2.5	Ferramenta de Software para Análise - Python . . . . .	48
3.2.6	Padrão para Intercâmbio da Informação - COMTRADE . . . . .	48
<b>4</b>	<b>ALGORITMO PROPOSTO PARA TMO . . . . .</b>	<b>50</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS . . . . .</b>	<b>58</b>
5.1	Comportamento do Sistema Teste sob Faltas . . . . .	58
5.2	Desempenho do classificador de faltas . . . . .	59
5.2.1	Faltas Monofásicas . . . . .	60
5.2.2	Faltas Bifásicas . . . . .	65
5.2.3	Faltas Bifásicas à Terra . . . . .	68
5.2.4	Faltas Trifásicas . . . . .	70
5.3	Transitórios de Energização da TMO . . . . .	74
5.4	Análise de Sensibilidade do Classificador . . . . .	74
5.5	Análise do Desempenho do Algoritmo . . . . .	76
5.5.1	Análise Estatística da Resposta do Classificador de Fases Faltosas . . . . .	76
5.5.2	Análise da Precisão Relativa do Classificador de fases . . . . .	78
5.6	Desempenho do Classificador de Fases no Relé SEL-421 . . . . .	79
5.7	Comparação dos Diferentes Métodos Existentes . . . . .	82
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS . . . . .</b>	<b>84</b>
6.1	Conclusão . . . . .	84
6.1.1	Algoritmo Proposto para a Classificação de Falta na TMO . . . . .	84
6.1.2	Implementação do Algoritmo Proposto no Relé SEL- 421 . . . . .	85
6.2	Propostas para Continuação em Trabalhos Futuros . . . . .	86
	<b>Referências . . . . .</b>	<b>87</b>
	<b>Anexos . . . . .</b>	<b>90</b>
	<b>ANEXO A Script Python . . . . .</b>	<b>91</b>
A.1	Leitura Arquivos Comtrade . . . . .	91
	<b>ANEXO B Script SEL-421 . . . . .</b>	<b>98</b>
B.1	Algoritmo Classificação de Falta . . . . .	98

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Motivação

Em países de amplas extensões territoriais e com uma grande população, como por exemplo, Brasil, Rússia e China, ocorre com frequência que grandes fontes de energia se encontram distantes dos centros de consumo, sendo necessário o transporte de grandes blocos de potência por longas distâncias para atender ao crescimento contínuo da demanda de energia elétrica. Desta forma, há na área de planejamento uma constante busca por soluções robustas e de baixo custo para os novos troncos de transmissão a serem construídos. Uma das propostas que tem despertado interesse dos pesquisadores é a transmissão da energia em Corrente Alternada (CA) não convencional a muito longa distância, conhecida como Transmissão em Meia Onda (TMO). A sua principal característica é ser uma conexão ponto a ponto (Elo CA), ou seja, uma linha de corrente alternada que não necessita de subestações intermediárias, nem de compensação reativa no seus terminais, independentemente da potência transmitida. A linha TMO se comporta em regime permanente como uma linha curta, sendo uma alternativa economicamente viável à solução atualmente utilizada no mundo, especificamente a transmissão em corrente contínua em alta tensão (Elo HVDC) (MOREIRA, 2017).

No Brasil, segundo dados do Plano Decenal de Expansão de Energia 2030 (EPE, 2020), estima-se que a demanda de energia elétrica terá um crescimento médio anual de 3,1% entre 2020 e 2031. A Figura 1.1 apresenta o gráfico da taxa de crescimento anual da demanda no Brasil.

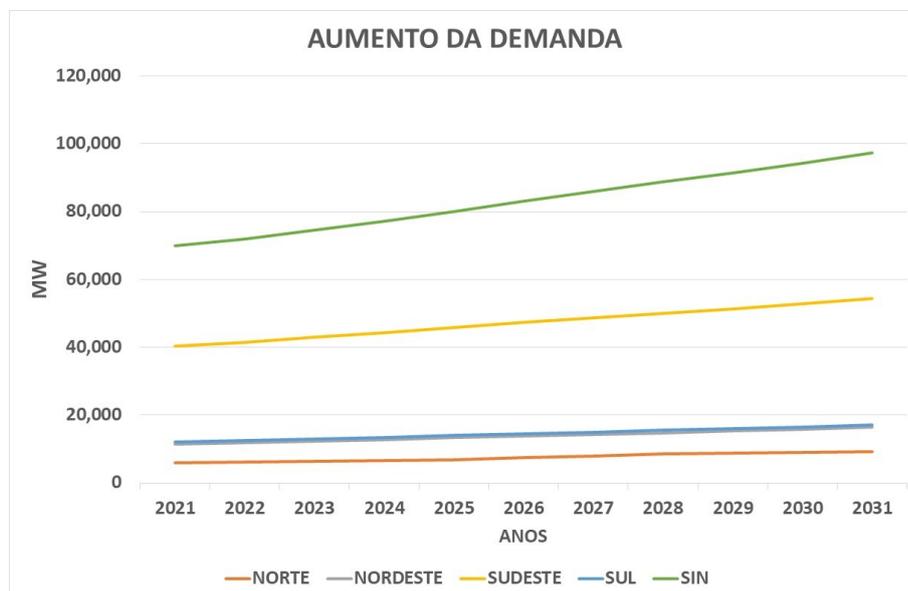


Figura 1.1 – Consumo de Energia, ano 2021 - 2031, Fonte:(EPE, 2020).

Para fazer frente ao crescimento da demanda de forma segura, econômica e com respeito à legislação ambiental, o Brasil dispõe de grande potencial energético, com destaque para as fontes renováveis de energia (hidráulica, eólica, biomassa e solar). Estima-se que até 2030 será necessária a contratação de mais 12 GW de geração eólica, onde o grande potencial se encontra na região Nordeste do país (EPE, 2020).

O transporte desses grandes blocos de energia elétrica fica a cargo da rede de transmissão do sistema interligado brasileiro, conhecido pela sigla SIN (Sistema Interligado Nacional). Com referência à expansão da rede de transmissão do SIN, a Figura 1.2 mostra o sistema de transmissão planejado para o ano de 2024 (ONS, 2019). Percebe-se que a rede de transmissão do SIN é composta majoritariamente por linhas de transmissão convencionais de corrente alternada, conhecida na siglas em inglês de HVAC, de diferentes níveis de tensão, sendo a expansão futura baseada principalmente na rede convencional de transmissão de 500 kV (ONS, 2018).

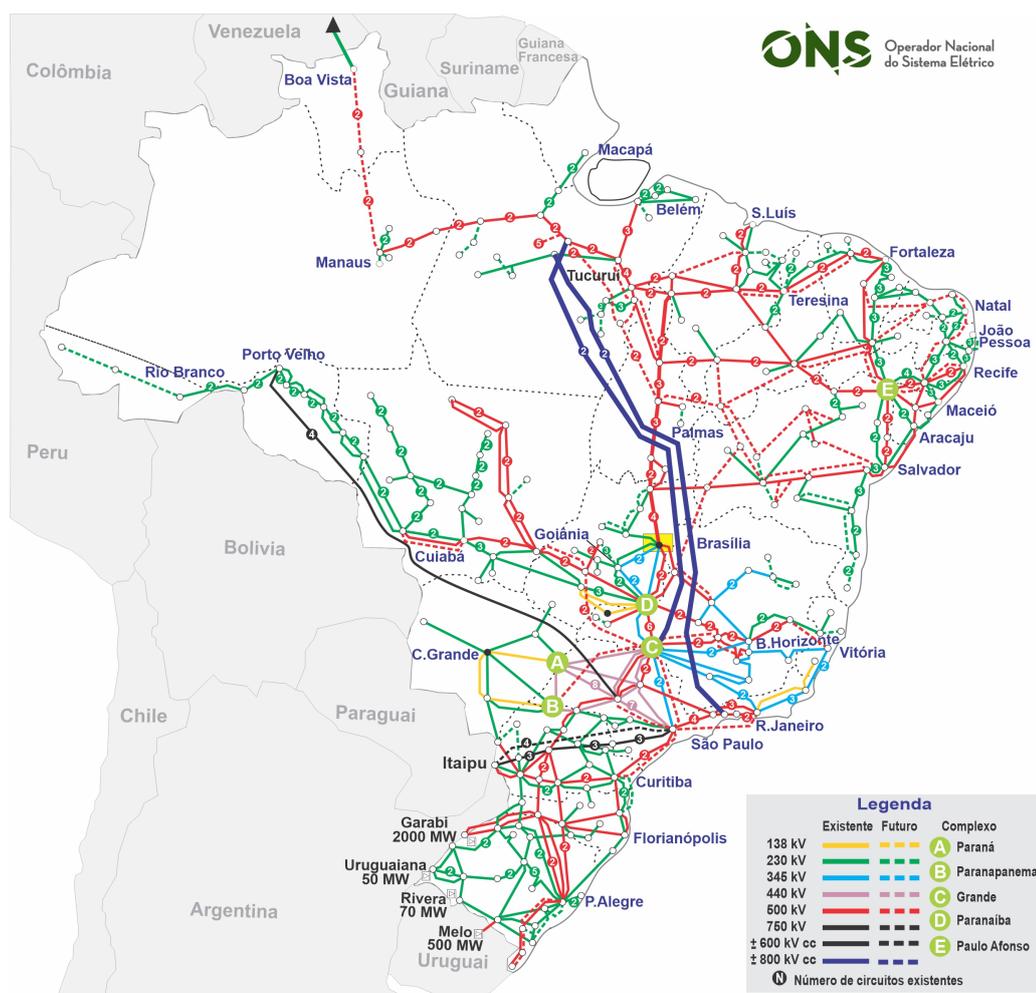


Figura 1.2 – Mapa do Sistema de Transmissão – Horizonte 2024. Fonte:(ONS, 2019).

Também podemos observar em operação, dois bipolos HVDC (*High-Voltage Direct Current*) de 600 kV saindo de Itaipu e outros dois do complexo do Madeira (usinas de Santo

Antônio e Jirau). Finalmente, temos mais dois bipolos de 800 kV do complexo de Xingu, ampliando a capacidade de transferência de energia dos subsistemas Sul e Norte para o Subsistema Sudeste, respectivamente.

Devido às grandes distâncias entre sistemas de geração e de consumo de energia elétrica, podemos listar as seguintes dificuldades para se efetuar a expansão do sistema interligado nacional com o uso de linhas tradicionais de extra alta tensão em CA:

- O fluxo de potência em uma linha de transmissão HVAC é determinado pelas condições dos sistemas nos seus terminais, sendo a quantidade de potência ativa transmitida proporcional à diferença do ângulo de tensão entre os terminais, e a potência reativa afetada pela magnitude da tensão (CIGRE, 2012).
- A distância de transmissão das linhas HVAC é limitada por seus limites térmicos, a regulação de tensão causada pelo fluxo de potência reativa ao longo da linha e problemas de estabilidade em regime permanente, o que leva a uma limitação geral da distância de transmissão (CIGRE, 2012).
- As linhas de transmissão HVAC apresentam uma demanda de energia reativa dependente da carga que pode afetar a corrente nominal, e pode requerer compensação de potência reativa nos seus terminais e em pontos ao longo da linha para garantir o nível de tensão desejado e a capacidade de transferência de potência adequada (CIGRE, 2012).

Frente a isso, em função das grandes distâncias que os futuros troncos de transmissão terão que cobrir, o Brasil apresenta as características necessárias para considerar a TMO como sendo uma boa alternativa para a transmissão de energia a muito longa distância, o qual pode redundar em menores custos econômicos, quando comparado a uma alternativa HVDC. Segundo (SAMORODOV *et al.*, 2017), uma comparação econômica entre as alternativas TMO e HVDC como troncos de transmissão de 6.000 MW em 2.500 km, mostrou que o investimento (CAPEX - Despesa de capital) para a TMO pode ser considerado 30% (1,15 bilhões de dólares) inferior ao de um HVDC, com o custo anual total (OPEX - Despesa de operação) 15% menor.

Quanto à transmissão de energia elétrica não convencional a longa distância em corrente alternada (TMO), esta é uma tecnologia que vem sendo analisada desde a primeira metade do século XX, motivando a elaboração de muitos trabalhos científicos. Diversos estudos e análises foram e estão sendo propostos na literatura com intuito de corroborar e tornar realidade esta alternativa de transmissão de energia elétrica a grandes distâncias (MOREIRA, 2017). Apesar do esforço, ainda é preciso amadurecer algumas áreas específicas como, por exemplo, os esquemas de proteção, incluindo a classificação, seleção e localização de faltas. Os resultados obtidos de alguns destes estudos têm demonstrado que o comportamento da TMO ante um curto-circuito

apresenta características distintas ao da linha de transmissão de comprimento convencional. Especificamente, à medida que o defeito ocorre mais afastado do terminal emissor, em direção ao meio da linha, as magnitudes da corrente de defeito crescem, mas posteriormente se reduzem, tornando-se menores do que a corrente de carga. Em (ORTEGA; TAVARES, 2018) são analisadas as tensões de faltas, e as mesmas apresentam comportamento semelhante ao de linhas convencionais na região mais próxima do terminal emissor, mas à medida que o defeito se afasta, as tensões podem apresentar valores iguais ou superiores ao das tensões em regime permanente. Isto porque a região central da linha vista dos terminais tem uma resposta para falta como de alta impedância, fazendo com que os algoritmos de proteção de relés comerciais tenham um baixo desempenho quando usados em linhas TMO.

Diferentes trabalhos foram apresentados na última década envolvendo faltas, sistemas de proteção e/ou seletor e localização de faltas para TMO (ESPINOZA; TAVARES, 2018; FENG *et al.*, 2016; SHI *et al.*, 2018; WANG *et al.*, 2018), entre outros. Todos esses trabalhos apontam para o fato de que os seletores de fases faltosas e os localizadores de faltas baseados nas componentes simétricas e usados nas proteções de linha convencionais, não têm um bom desempenho na detecção de faltas na TMO. Isto ocorre pelo comportamento atípico da TMO diante de diferentes tipos de faltas e porque os relés comerciais não foram projetados para trabalhar com linhas de transmissão longas, ou seja, os mesmos possuem limitações no ajuste do alcance de impedância, no alcance do comprimento da linha, e no algoritmo de cálculo.

Na presente pesquisa, foi desenvolvido um novo método para a classificação de faltas para uma linha de um pouco mais de meio comprimento de onda, isto é, com comprimento igual a 2600 km. O método proposto, especificamente um novo algoritmo de classificação da fase faltosa, é baseado nas transformadas de Clarke, componentes alfa, beta e zero dos fasores de corrente. O algoritmo foi implementado e testado no simulador digital em tempo real (RTDS), e avalia a taxa de variação (derivadas) das magnitudes das correntes (fasores) das componentes de Clarke, apenas usando os dados obtidos do extremo de envio da linha para determinar o tipo de falta. O algoritmo apresentou um bom desempenho para faltas monofásicas, bifásicas, bifásicas a terra e trifásicas na TMO. A vantagem do algoritmo é que ele pode ser implementado em relés baseados em microprocessadores ou em software de análise pós-evento, sem requisitos de processamento adicionais. A partir da análise de sensibilidade realizada, podemos observar que o algoritmo classificador de defeito proposto não é afetado pela impedância da falta, pelo nível de carga da linha ou pelo ângulo de incidência da falta. O modelo de teste foi implementado no software RSCAD do Simulador Digital em Tempo Real (RTDS) e no relé comercial SEL-421, numa configuração em malha fechada com equipamento (hardware in the loop - HIL).

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo Geral

O presente trabalho de pesquisa tem como objetivo principal o desenvolvimento de um novo algoritmo classificador de faltas que possa superar o comportamento atípico da linha TMO ante faltas, o que não é possível com os classificadores de falta convencionais embarcados em relés comerciais. Para isto, utiliza a informação das medições associadas às magnitudes de correntes do relé local da linha TMO durante a ocorrência de faltas monofásicas, bifásicas, bifásicas à terra e trifásicas aplicadas ao modelo de teste e desenvolvidas no RTDS. As componentes de Clarke dos fasores de corrente são obtidas, e as suas derivadas são utilizadas para a classificação do defeito.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

Dentre os objetivos específicos a serem atingidos destacam-se:

- Implementar o algoritmo de classificação de faltas no software RSCAD, o qual gerará os resultados das simulações em arquivos com formato COMTRADE.
- Leitura e manipulação dos arquivos em formato COMTRADE, com script realizado com a biblioteca Pandas, e Numpy de Python.
- Visualizar os dados através da biblioteca Matplotlib de python.
- Validar o algoritmo proposto para a classificação das fases faltosas com o modelo de teste da linha TMO para as simulações dos diferentes tipos de faltas. A partir dos resultados, avaliar o seu desempenho e comparar com pesquisas similares para linhas TMO.
- Avaliar o comportamento do algoritmo implementado no IED SEL-421 para os diferentes tipos de falta e algumas manobras típicas, como a energização da linha TMO e o religamento tripolar.

## 1.3 Contribuições da Pesquisa

A contribuição nesta pesquisa consiste no desenvolvimento de um algoritmo para classificação de faltas para uma linha de transmissão de meio comprimento de onda que é robusto e imune às diferentes condições de carregamento e resistência de falta. O método foi testado em relé comercial no ambiente de simulação digital em tempo real na condição de malha fechada com equipamento (hardware-in-the-loop).

Pode-se afirmar que é importante o desenvolvimento de um algoritmo capaz de determinar de forma rápida e confiável o tipo de defeito na TMO. Este novo algoritmo deve ter as seguintes características: ser preciso, de baixo custo computacional e facilmente aplicado em relés de proteção comerciais e/ou algoritmos de análise pós-falta.

Neste trabalho apresentamos um novo algoritmo de classificação de fases faltosas para a TMO baseado nas componentes de Clarke (CLARKE, 1943). O algoritmo foi testado no ambiente de simulação em tempo real (RTDS) através de testes de hardware-in-the-loop (HIL) e compara a taxa de variação (derivadas) das magnitudes das componentes de Clarke das correntes, ou seja, o algoritmo proposto é uma proteção fasorial. O algoritmo apresentou um desempenho robusto, especificamente para as faltas monofásicas, bifásicas e trifásicas na TMO. A partir da análise de sensibilidade realizada podemos observar que o classificador de fases sob falta proposto não é afetado pela impedância de falta, pelo nível de carregamento da linha, ou pelo ângulo de incidência da falta. O algoritmo classificador de fases com faltas aqui proposto pode ser utilizado para o sistema de proteção ou para análise pós evento ou localização de faltas (off-line), isto é, o mesmo pode ser implementado tanto em um relé comercial como em um PC que estaria localizado remotamente, como, por exemplo, no centro de controle ou no escritório dos engenheiros de controle e proteção.

## 1.4 Estrutura do Trabalho

A presente tese é desenvolvida em 6 capítulos, conforme descrito a seguir:

No capítulo 1 é apresentada a introdução da tese contendo a motivação, a relevância, a justificativa e os objetivos da pesquisa.

No capítulo 2, no que lhe concerne, sucede uma revisão teórica do estado da arte relacionado aos estudos realizados da TMO, tanto ao nível mundial como no Brasil. Adicionalmente, apresentamos as características dos diferentes métodos para a classificação de falta em linhas convencionais, como também em linhas de TMO.

Já no capítulo 3 relata-se a metodologia usada para o desenvolvimento desta pesquisa, onde há uma breve descrição dos materiais usados, incluso o novo algoritmo classificador de fases sob falta proposto, onde descrevemos a sua característica e a sua implementação no RTDS e no relé comercial SEL-421. Além disto, explicamos o processo para a seleção de faltas.

No capítulo 4, discorremos sobre o algoritmo proposto nesta pesquisa.

No capítulo 5 por sua vez, demonstramos os principais resultados obtidos do sistema teste utilizado para realizar as simulações dos defeitos na linha TMO e verificar a eficácia do algoritmo desenvolvido.

E por fim, no capítulo 6, apresentamos as principais conclusões como resultado da pesquisa e a proposta de trabalhos futuros.

Além disso, a tese conta com dois apêndices. O primeiro apresenta o script, em Python, elaborado para leitura, tratamento e plotagem dos arquivos comtrade, sendo gerados pelo RTDS ou pelas proteções. Já o segundo apresenta a implementação do algoritmo proposto, realizada no ambiente de programação do relé SEL-421.

## 1.5 Trabalhos Publicados

Como resultado desta pesquisa, apresentamos os trabalhos desenvolvidos:

- Trabalho publicado em revista
  - JIMENEZ, D. F.; DIAS, O.; TAVARES, M. C.. *Fault Classification and Phase Selector Algorithm for Half-Wavelength Transmission Lines*. Electric Power Systems Research, 2022, vol. 203, p. 107637.
- Trabalho apresentado em congresso
  - JIMENEZ, D. F.; DIAS, O.; TAVARES, M. C.. *Seletor de Fases Faltosas para Linhas de Transmissão de um Pouco Mais de Meio Comprimento de Onda*. XXVI Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (SNPTEE), 15-18/maio/2022, RJ, Brasil.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O sistema de transmissão de energia é um componente chave para o fornecimento de energia elétrica confiável, contínua e econômica. A operação do sistema de transmissão integrado no sistema interligado nacional é uma tarefa complexa e desafiadora, pois deve considerar as crescentes interligações nacionais e regionais, incluindo as questões de estabilidade do sistema. Equipamentos inovadores e novas tecnologia podem ajudar a manter a continuidade do suprimento da energia (CIGRE, 2012).

Neste capítulo serão apresentadas as principais características da transmissão a longa distância não convencional em corrente alternada TMO que é a principal alternativa para a transmissão de grandes blocos de potência a grandes distâncias utilizada até o momento, especificamente o Elo em corrente contínua HVDC.

Apresentaremos um breve resumo histórico das principais pesquisas realizadas no Brasil e no mundo relacionadas com a linha TMO, e os principais resultados obtidos, o que permitirá alcançar um amplo entendimento do comportamento da TMO em condições de regime permanente e sob condições transitórias.

Com relação à transmissão HVDC, descreveremos os seus principais componentes e suas respectivas características de funcionamento, como também os custos médios para efeito de comparação com a TMO.

Por último, descreveremos brevemente a falta e os tipos de falta que podem ocorrer em linhas de transmissão, e a importância da classificação das faltas no fornecimento de energia elétrica.

### 2.1 Transmissão em Meio Comprimento de Onda

A transmissão HVAC não convencional a muita longa distância é denominada de Transmissão de Meio Comprimento de Onda (TMO), por estar associada à metade do comprimento de onda ( $\lambda$ ) do sinal senoidal na frequência de operação do sistema. No sistema brasileiro, por exemplo, com frequência de operação de 60 Hz, a metade do comprimento de onda numa linha sem perdas seria de 2500 km, considerando uma velocidade de propagação igual à velocidade da luz no vácuo (300.000 km/s), como calculado pela equação 2.1 (MOREIRA, 2017).

$$\lambda = \frac{300.000}{60} = 5000 \text{ km} \quad (2.1)$$

No sistema de transmissão HVAC convencional, as linhas são naturalmente curtas ou reduzidas eletricamente através do uso de compensação reativa para que tenham comprimentos elétricos muito menores do que  $1/4$  do comprimento de onda. Isto é necessário para que a tensão no terminal remoto seja próxima da tensão do terminal emissor quando a linha estiver operando em carga leve ou em vazio (MOREIRA, 2017). A principal característica da TMO é ter um comportamento em regime permanente igual ao de uma linha de transmissão CA convencional curta, independente da potência transmitida, o que significa que em operação normal ou em vazio, as tensões em ambos extremos da linha estarão próximas de 1,0 pu. Portanto, a linha TMO não precisa de compensação de reativos para controle da tensão nos terminais, nem de subestações intermediárias para energização por trechos, o que a torna uma solução natural e de baixo custo para o transporte de energia a muito longas distâncias. A TMO é uma transmissão ponto a ponto, sendo também conhecida como Elo CA. Outra característica importante para garantir uma operação estável é que a TMO deverá operar no terceiro quadrante, o que significa que a diferença angular entre as tensões dos extremos da linha deverá ser de 190 graus elétricos. A TMO operará como uma linha curta ( $10^\circ$  elétricos), o que representa um comprimento físico de 2600 km, aproximadamente para sistemas em 60 Hz. (MOREIRA, 2017).

A Figura 2.1 apresenta o desenvolvimento histórico das principais pesquisas relacionadas com o tema da Linha de Meio Comprimento de Onda, realizadas no mundo por um período de mais de 80 anos.

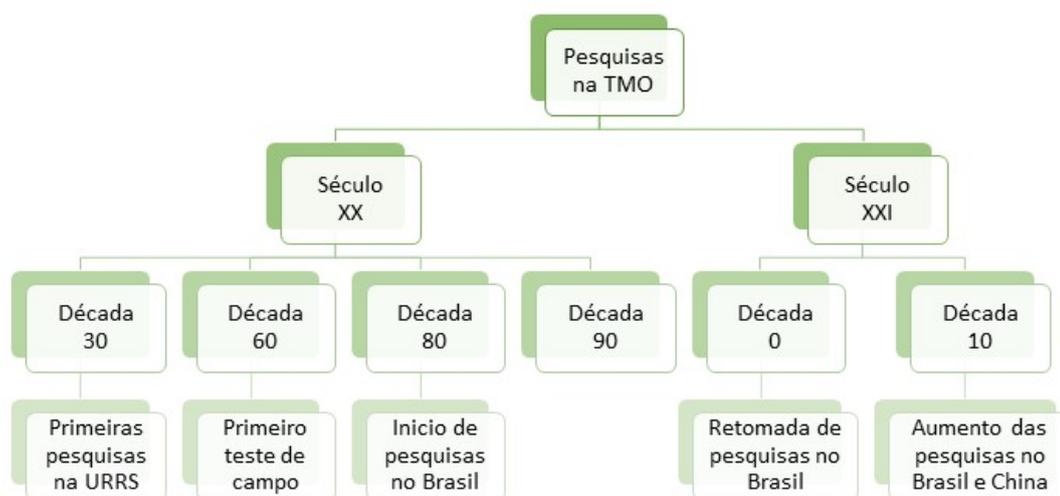


Figura 2.1 – Histórico dos estudos da TMO.

### 2.1.1 Principais Pesquisas Realizadas na TMO

Com relação às pesquisas publicadas, os primeiros estudos para este tipo de linhas são do século passado, nos primeiros anos da década de trinta, na extinta União de Repúblicas Socialistas Soviéticas (URRS). Os resultados principais destes estudos desenvolvidos por

pesquisadores soviéticos foram ligados à compensação de linhas de transmissão a longas distâncias para a sintonização em meio comprimento de onda, sendo possível listar as seguintes características (VIDIGAL, 2010):

- A tensão no ponto central da linha é diretamente proporcional à corrente de carga no terminal receptor, ou seja, à potência entregue naquele terminal. Isto é, estando a linha em vazio a tensão no meio da linha seria muito baixa (praticamente nula).
- A corrente no meio da linha é diretamente proporcional à tensão no terminal emissor, sendo, portanto, basicamente constante e independente da carga transportada.
- As correntes e tensões nos extremos da linha são iguais em módulo, e contrárias em fase. Isto é, o ganho de tensão em vazio é igual a 1,0 e o ângulo elétrico de operação tem que ser igual o superior a  $180^\circ$ . Isto representa um comprimento igual ou superior a 2500 km. Como as tensões nos terminais são praticamente fixas e iguais entre si, não há necessidade de efetuar compensação reativa em função do carregamento da linha. Isto significa que as tensões terminais não variam para operação em carga leve nem pesada.

Em 1964, (HUBERT; GENT, 1965), apresentaram as vantagens e desvantagens de um sistema de transmissão de meia onda ponto a ponto, em relação aos problemas de operação comuns da transmissão de linhas longas, relacionados com a estabilidade do sistema, o excesso de reativo nos cenários de carga leve, o efeito Ferranti e a auto-excitação de geradores. Assumiram que todas as linhas estavam operando em 60 Hz e não teriam comprimento natural de meia onda ( $180^\circ$ ). Propuseram dois métodos para aumentar o seu comprimento elétrico através da instalação de compensação para uma linha aérea exemplo de 500 kV e 900 km de comprimento, e estudaram a resposta da linha TMO frente às manobras típicas. O primeiro método era baseado na sintonização de equipamentos nos extremos da linha, e o segundo consistia na adição de capacitores em derivação ao longo da linha. Os resultados mostraram que a linha compensada apresentava o mesmo comportamento da linha de meia onda de comprimento natural durante a operação normal e sob diferentes condições de carregamento.

Com relação às análises realizadas sobre as correntes de curto-circuito, verificou-se que:

- As magnitudes das correntes variavam grandemente com a localização da falta, e as mesmas não apresentaram problemas incomuns, pois suas magnitudes encontraram-se nas faixas usuais. Especificamente, as faltas no centro da linha produziam correntes para a terra menores do que as nominais (associadas ao SIL - potência natural da linha) e as faltas perto dos extremos poderiam causar correntes para a terra da ordem de 15 a 20 pu.

- Com relação impacto dos defeitos nas tensões de fase, no caso de faltas próximas aos extremos da linha, surgem tensões elevadas nas fases sem defeito para faltas bifásica-terra no extremo receptor do sistema avaliado.

Em 1968 na URSS, Vershkov (VIDIGAL, 2010), informaram que foi realizado um teste de campo numa rede de 500 kV que formava um sistema de Meio Comprimento de Onda de comprimento de 3000 km à frequência do sistema (50 Hz), sendo que os resultados mostraram que:

- A transmissão foi implementada sem grandes dificuldades.
- Os resultados dos testes foram muito próximos das simulações.
- Há necessidade de desenvolver modelos matemáticos mais completos, para a representação dos fenômenos transitórios e para a representação do efeito coroa.
- Há necessidade de desenvolver sistemas de proteção para este tipo de sistema de transmissão.

Em 1969, (PRABHAKARA *et al.*, 1969), pesquisaram o comportamento e avaliaram o desempenho de uma linha natural de meio comprimento de onda, estabelecendo uma base para a comparação com linhas longas sintonizadas para meio comprimento de onda. Em relação aos resultados das análises dos estudos realizados, as principais conclusões para a linha de meio comprimento de onda são apresentadas a seguir:

- A linha de meia onda não deve transmitir potência com fator de potência diferente do unitário, uma vez que os perfis de tensão e corrente são drasticamente alterados. *Deve ser destacado que a linha TMO deve ser tratada de forma similar ao Elo CC, onde somente potência ativa é transmitida.*
- A eficiência é muito baixa em cargas leves (<0,5 SIL) e é máxima para o carregamento nominal (1,0 SIL). Em cargas mais altas, a eficiência se reduz ligeiramente.
- A ocorrência de sobretensões na frequência do sistema é inevitável durante as condições de defeitos, e *gaps* devem ser usados para proteger contra essas sobretensões.
- As tensões e correntes no meio da linha são proporcionais às correntes e tensões no terminal remoto da linha, respectivamente.

Em 1988, (ILICETO; CINIEMI, 1988) analisaram o comportamento em regime permanente e sob condições de transitórios de uma linha TMO de circuito duplo, de 800 kV e

2500 km de comprimento. Eles também propuseram um modelo para a simulação das perdas por efeito corona. Os resultados demonstraram que as perdas por efeito corona limitam as sobretensões sustentadas produzidas por manobras na linha TMO sem carga a 2,55 pu e também limitam a potência máxima que pode ser transmitida a 1,5 vezes o SIL. A eficiência da linha TMO estudada ficaria entre 86-87% para um carregamento entre 0,5 a 1,25 SIL.

No caso do Brasil, os primeiros estudos das linhas de transmissão a longa distância iniciaram no final do século XX, a partir da década de 80.

Em (PORTELA *et al.*, 2007), apresenta-se um sistema de transmissão CA não convencional para a transmissão de grandes blocos de energia por longas distâncias. O sistema foi proposto durante o estudo de soluções adequadas para a expansão do sistema elétrico brasileiro, focando na exploração dos recursos hidrelétricos disponíveis da bacia Amazônica. Através da análise de custos, mostrou-se que a transmissão não convencional tem custos mais baixos que soluções baseadas na extrapolação de sistemas de transmissão convencionais.

Em (TAVARES; PORTELA, 2008), com o objetivo de dar algum suporte técnico aos engenheiros do planejamento, um teste de campo foi proposto. O teste nunca foi realizado, e usaria elementos do sistema de energia existente para simular o Elo CA. A linha proposta seria montada a partir de um conjunto de linhas de 500 kV conectadas em série sem compensação reativa (série ou paralela). Como as linhas existentes são compensadas, para a realização do teste todos os reatores em derivação deveriam ser desconectados, todas as compensações em série deveriam estar em curto-circuito, e todos os disjuntores associados às linhas atuais deveriam ser bloqueados em posição fechada. A condição do teste a ser realizado consistiria na energização de uma linha de 2600 km, sem compensação reativa, utilizando apenas um disjuntor. A linha de teste proposta foi cuidadosamente estudada, e deveria:

- Avaliar o comportamento da TMO em operação permanente e em condições de defeito.
- Ter informações adequadas do comportamento da linha TMO em condições de teste e antes do teste, para comparação com os resultados.
- Avaliar o comportamento da “linha TMO teste” para vários tipos de falhas e vários locais de falha, e para definir um simples sistema de proteção que permitisse desligar a linha com o único disjuntor usado no teste, para uma eventual falha durante o teste de energização.

Para os estudos da linha, o teste proposto foi simulado com os programas PSCAD e ATP. A sobretensão obtida para a manobra de energização da linha foram menores do que 2,0 pu, ou seja, os valores obtidos são inferiores às de linhas de tamanho médio.

Em (VIDIGAL, 2010), é apresentada uma análise do comportamento de uma linha de transmissão de um pouco mais de meio comprimento de onda (2600 km), 500 kV, a qual

tem como base os dados da interligação Nordeste-Sudeste, com um comprimento elétrico de 191,6°. A linha TMO é considerada isolada, e alimentada por uma fonte infinita, para diferentes condições de operação.

A Figura 2.2 apresenta o comportamento da tensão da linha TMO, considerando diferentes carregamentos de potência.

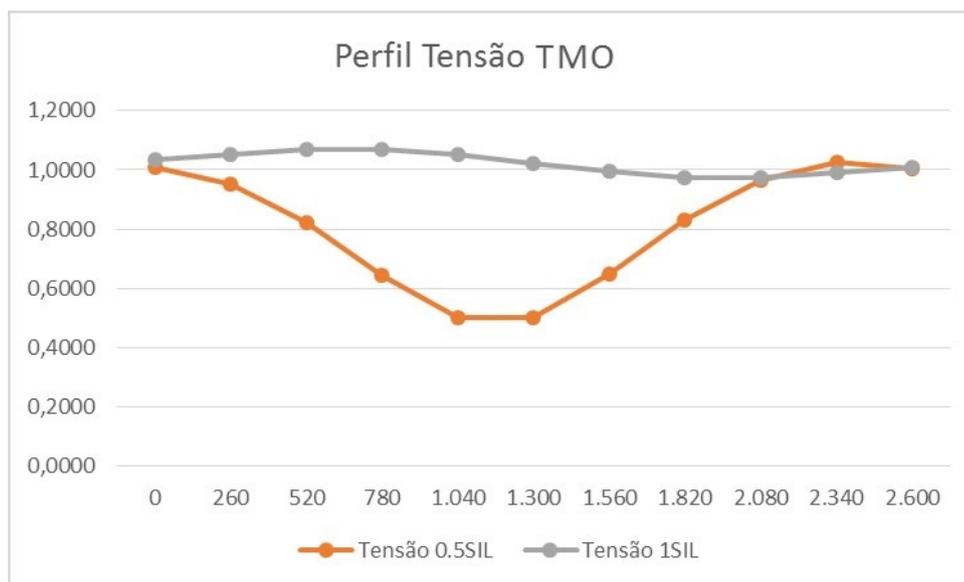


Figura 2.2 – Perfil de tensão ao longo de uma linha, 800 kV, 2600 km, para diferentes níveis de carregamento com fator de potência unitário.

Em (ORTEGA; TAVARES, 2018), apresenta-se uma análise detalhada para uma linha TMO sob condição de falta, com foco nos casos mais críticos. Os fatores que afetam a severidade das falhas nas linhas TMO são: tipo e localização da falha, os sistemas equivalentes conectados nos seus terminais, e o nível de carga da linha, nesta ordem de importância. Existem duas regiões críticas para faltas trifásicas, as mesmas produzem as sobretensões mais severas, cada uma associada aos sistemas conectados ao terminal emissor e ao terminal receptor. Os pontos críticos de falha são definidos pela força do terminal remoto e correspondem à região entre 70 e 90% medidos a partir do terminal emissor da linha. Os valores das sobretensões podem alcançar o valor de 2,5 pu em 1 ciclo. As faltas fora da região crítica não são severas e podem ser eliminadas sem nenhum processo especial. As faltas monofásicas são menos graves em relação aos níveis das sobretensões, devido à atenuação causada pelo circuito equivalente de sequência zero. O mesmo autor propõe um método de mitigação de sobretensões baseado na instalação de spark-gaps (SG - espinterômetros).

A Figura 2.3, apresenta a tensão máxima gerada ao longo da linha TMO, vista desde o extremo emissor, para faltas trifásicas, e com carregamento de 1,0 SIL. O valor máximo é menor do que 2,0 pu, exceto na zona de ressonância, onde temos um corte do sinal feito propositalmente como indicativo da ação da proteção contra sobretensões. Não há interesse em

mostrar magnitudes de tensões além de 2,5 pu, uma vez que o método de mitigação irá reduzir drasticamente estes valores.

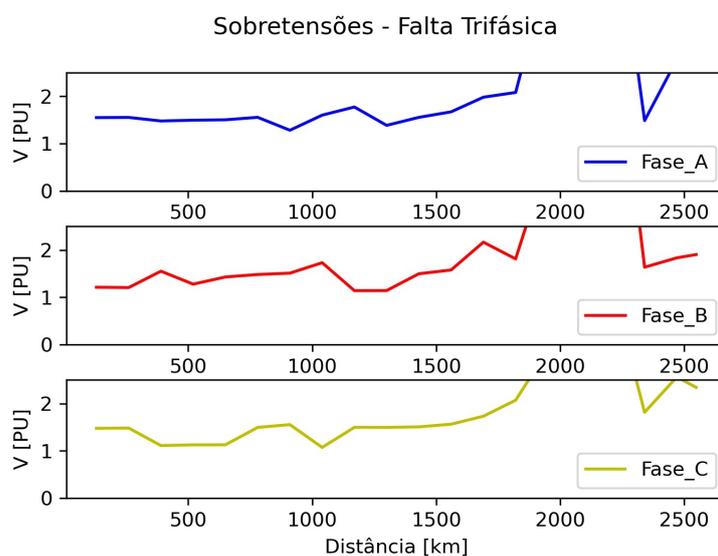


Figura 2.3 – Sobretensões para faltas trifásicas ao longo da linha TMO - Medido no terminal Emissor - Carregamento de 1,0 SIL. Sem método de mitigação.

## 2.2 Corrente Contínua em Alta Tensão - HVDC

Com o intuito de contextualizar a corrente contínua em alta tensão (HVDC), uma breve descrição sobre este tipo de transmissão será apresentada nesta seção.

A Corrente Contínua em Alta Tensão (HVDC) é uma tecnologia utilizada no sistema elétrico desde 1954, e tem desempenhado um papel vital tanto na transmissão de longa distância quanto na interconexão de sistemas de corrente alternada. Duas tecnologias básicas de conversores são usadas em sistemas de transmissão HVDC, especificamente os conversores comutados em linha (LCC), baseado em tecnologia de tiristores, usados para transmissão de grandes blocos de potência a longa distância, e os conversores comutados por tensão (VSC). Devido ao desenvolvimento recente de dispositivos de eletrônica de potência, esquemas HVDC baseados em VSC estão disponíveis desde o final do século XX para aplicações em transmissão de energia elétrica. Esses sistemas HVDC baseados em VSC, proporcionam algumas vantagens funcionais em relação aos esquemas HVDC baseados em LCC e à transmissão convencional HVAC, sendo limitados na tensão de operação ( $\leq 600$  kV) e capacidade de potência ( $< 1600$  MW) (CIGRE, 2012). A capacidade técnica, aliada à vantagem econômica e baixas perdas operacionais, tornam o LCC-HVDC uma solução prática para ampliar ou melhorar as interconexões do sistema de energia.

A figura 2.4 apresenta os principais componentes para uma instalação típica HVDC, do tipo LCC, para um extremo da linha, com destaque para a ponte retificadora de 12 pulsos, e

os filtros de corrente contínua e alternada. O conversor apresenta uma associação em série de retificadores, que é empregada quando se deseja uma tensão contínua de saída elevada que não pode ser obtida com apenas um retificador (CIGRE, 2012).

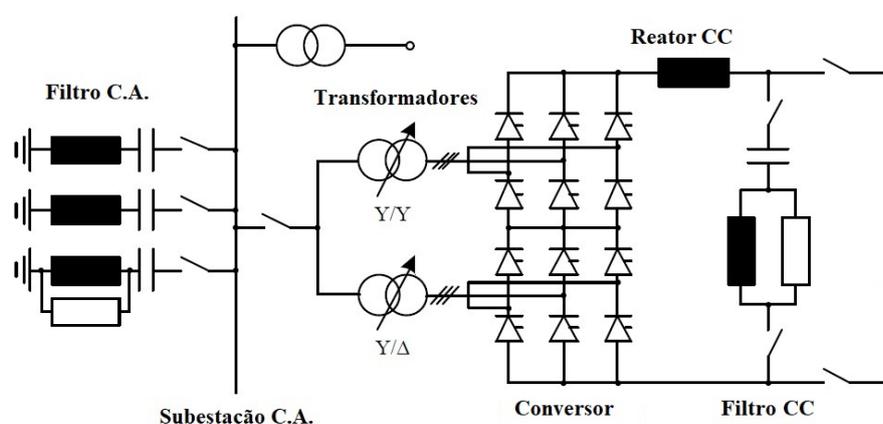


Figura 2.4 – Principais componentes de um sistema LCC-HVDC (CIGRE, 2012).

## 2.2.1 Eletrônica de Potência - Conversores

A conversão CA-CC é realizada por conversores chamados retificadores. O que se espera de um retificador é que, em sua saída, seja disponibilizada uma tensão ou uma corrente CC, normalmente com pequena ondulação relativa ao respectivo valor médio. A redução da ondulação é obtida com a devida filtragem, empregando capacitores para filtrar a tensão e indutores quando se trata de filtragem da corrente (POMILIO *et al.*, 2013).

Cada conversor tem dois polos, um deles é conectado a saída de um transformador conversor com conexão estrela-estrela e o outro é conectado a um transformador conversor de conexão estrela-delta, isto porque usando as duas conexões é possível minimizar a geração de harmônicos (BAHRMAN, 2008).

Os conversores LCC podem operar apenas com a corrente alternada atrasada em relação à tensão (resposta indutiva), de modo que o processo de conversão exige o fornecimento contínuo de potência reativa para os tiristores. O fornecimento desta potência reativa necessária para a operação dos conversores do sistema HVDC é proporcionada pelos filtros de harmônicos (BAHRMAN, 2008).

## 2.2.2 Filtros

Os conversores HVDC introduzem harmônicos no lado CA e CC do sistema de transmissão, ou seja, na linha CC, gerando uma série de problemas como (PADIYAR, 1990):

- Interferência telefônica.

- Aumento das perdas e consequente aquecimento em máquinas e capacitores conectados ao sistema.
- Sobretensões devido à eventuais ressonâncias.
- Instabilidade dos controles do conversor, principalmente com esquema de controle de fase individual de geração de pulso de disparo.
- Interferência com sistemas de controle de ondulação usado no gerenciamento de carga.

Os filtros CA são usados para filtrar os harmônicos no lado CA e são críticos. Esses filtros podem ser do tipo passa banda sintonizado ou passa alta, e são necessários para fornecer a potência reativa consumida pela conversão. O reator de suavização CC junto com os filtros CC executam a função de filtrar harmônicos no lado CC do sistema

### 2.2.3 Custos

Na transmissão HVDC, o custo dos equipamentos nas terminais é maior que na transmissão HVAC, devido a eletrônica de potência (conversores e filtros), sendo menores os custos na linha de transmissão para a alternativa HVDC. Uma comparação econômica entre os de troncos de transmissão de CA e CC de 6000 MW em 2500 km, realizada em (SAMORODOV *et al.*, 2017), mostrou que o investimento para a TMO de circuito único pode ser considerado 30% inferior ao de HVDC e o custo anual total é 15% menor. Além disso, estudos realizados no Brasil mostram que a TMO pode ser considerada uma alternativa para troncos de transmissão muito longos (SAMORODOV *et al.*, 2017).

## 2.3 Sistemas de Proteção

As linhas de transmissão aéreas, pela ampla extensão do seu trajeto, são os elementos do sistemas de potência com a maior exposição aos fenômenos naturais (tempestades, descargas atmosféricas, contaminação, queimas, vegetação, etc), os quais podem gerar falhas no isolamento da linha, provocando curto-circuitos. Os curto-circuitos típicos no sistema de transmissão podem ser de dez tipos diferentes, entre as quais temos faltas monofásicas (envolvendo cada fase isoladamente), bifásicas e bifásicas a terra (envolvendo duas das três fases), e trifásicas (envolvendo ou não a terra). A monofásica é a mais frequente de todas, e a trifásica a que provoca, em geral, as maiores solicitações de corrente. As faltas nas linhas de transmissão aéreas, em sua grande maioria, podem ser classificadas em dois grupos, dependendo da continuidade do serviço (KEZUNOVIC *et al.*, 2014):

- Faltas Temporais ou Transitórias: São as mais usuais em linhas aéreas de transmissão e se caracterizam por serem auto recuperáveis, de maneira que a continuidade do serviço não seja afetada permanentemente. A grande maioria destas faltas são devido a descargas atmosféricas (SAHA *et al.*, 2009).
- Faltas Permanentes: Se caracterizam por deixar a linha fora de serviço, logo após a remoção do trecho envolvido no defeito, com possibilidade de interromper o fornecimento de energia às cargas que estão conectadas à rede. Neste caso, a restauração da linha é feita após ocorrida a reparação por parte do pessoal de manutenção de linhas, sendo necessário o conhecimento preciso do local da falta (SAHA *et al.*, 2009).

Quando ocorre um defeito em uma linha de transmissão, o sistema de proteção instalado em ambos extremos da linha deve detectar, classificar o defeito e remover rapidamente a linha através do comando de controle do disjuntor, com a finalidade de manter a estabilidade do sistema e manter a continuidade do fornecimento de energia (KEZUNOVIC *et al.*, 2014). Existem diferentes funções de proteção para linhas de transmissão (proteção de sobrecorrente, proteção diferencial e proteção de distância), sendo que na presente pesquisa será analisada a função de distância, que é uma proteção gradativa. A sua operação e seletividade dependem da medição local dos sinais de tensões e correntes, a partir dos quais a distância equivalente da falta é avaliada, comparando com os ajustes de zona previamente definidos (BONETTI *et al.*, 2016).

A Figura 2.5, apresenta um diagrama de blocos básico para um relé de distância baseado em microprocessador. Podemos observar no bloco de limites, os elementos de medição do relé formado pelos sub-blocos descritos a seguir (BONETTI *et al.*, 2016):

- Detecção de faltas: O seu objetivo é poder determinar a existência de uma condição anormal no sistema.
- Classificação e seleção de fases: O objetivo da função de identificação da fase faltosa na proteção de distância é fornecer informações sobre as fases envolvidas na falta e também se a terra está envolvida (para faltas fase-terra e fase-fase-terra). A identificação da fase com falta também é importante para as funções de localização de falhas, tele-proteção, disparo monofásico e religamento. Adicionalmente permite habilitar as unidades de medição apropriadas e inibir as unidades que não estão envolvidas na falha. A detecção da fase faltosa tem seus desafios ante condições de faltas de alta resistência, e faltas evolutivas, entre outras.
- Determinação direcional: A função de distância pode identificar a direcionalidade da falta, uma vez que para alguns esquemas de proteção é importante saber se a falta está

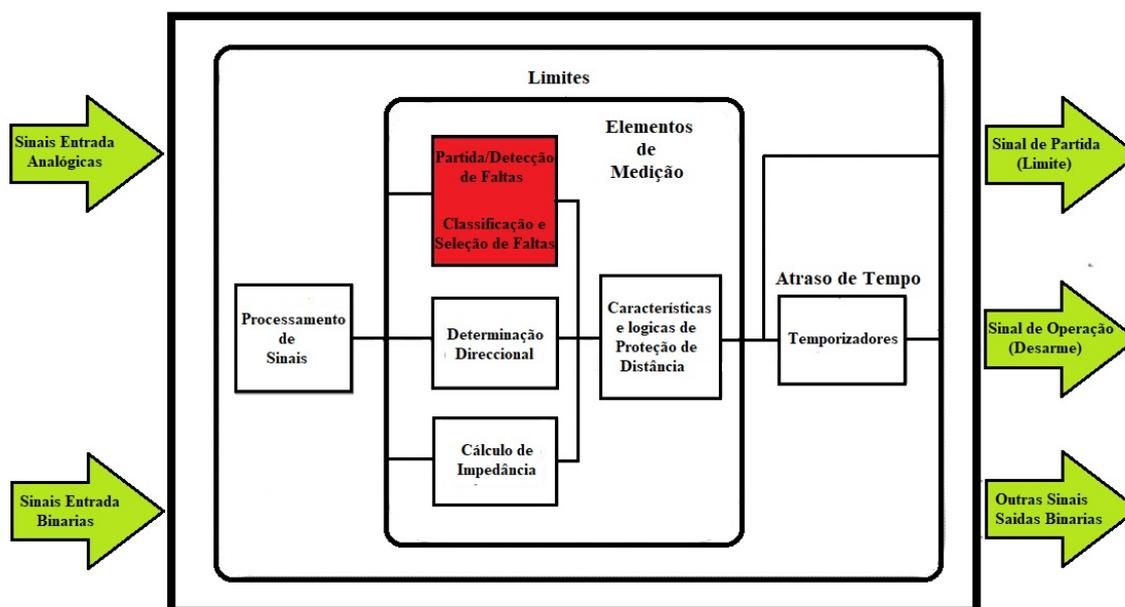


Figura 2.5 – Diagrama de blocos básico para relé microprocessado (BONETTI *et al.*, 2016).

localizada na frente ou atrás da posição do relé, para tomar uma decisão (disparo, envio de um sinal de comunicação de disparo ou bloqueio, entre outros). Cada proteção deve proteger somente o elemento que está sob sua responsabilidade (para frente), e não deve atuar para faltas atrás da sua zona de atuação (reversa).

- Cálculo de impedância: O relé deverá ter uma função de medição de impedância, e esta deverá ter uma característica de operação. A característica de operação dos relés são descritas por formas e figuras geométricas no plano de impedância ( $R$ ,  $X$ ). No momento em que ocorre um defeito, se a impedância aparente medida pelo relé se deslocar para dentro dos limites da característica de impedância do relé previamente definida, o relé operará. As características de operação do relé podem mudar dinamicamente ante situações transitórias ou condições de falta. Cada zona de operação do relé está associada a uma característica de operação em particular.

As funções anteriormente descritas apresentam informações importantes para caracterizar a lógica de proteção do relé.

### 2.3.1 Classificador de Fases com Faltas em Linhas Convencionais

Diversos autores têm estudado e proposto diversos algoritmos para determinar o tipo da falta. Na Figura 2.6, apresentamos as técnicas mais utilizadas na classificação de faltas, sendo possível agrupá-las em dois grandes blocos em função da técnica utilizada em relés comerciais e da técnica usando inteligência artificial.

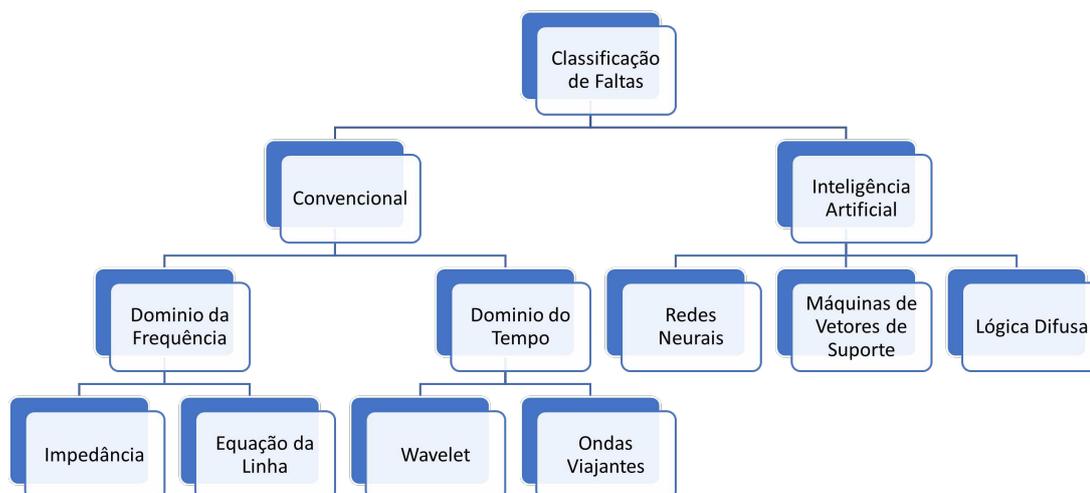


Figura 2.6 – Técnicas de classificação de faltas.

O objetivo da inclusão do módulo de classificação da falta é para uma rápida identificação das fases faltosas e com isto diminuir os tempos de cálculo dos parâmetros da função de proteção. Considerando, por exemplo, a função de distância: ao se identificar a falta, será iniciado o cálculo da respectiva impedância de defeito para uma rápida atuação da proteção. Especificamente, o tipo de defeito irá disparar o correto *loop* da função de distância. Existem diferentes métodos para determinar as fases faltosas no momento da ocorrência de uma falta, os quais usam, por exemplo, a mudança das grandezas elétricas durante o instante da falta (SAHA *et al.*, 2009). A seguir apresentam-se as características principais dos diferentes métodos:

- O mais simples é calcular o laço da impedância da fase ou fases faltosas, e comparar com a impedância máxima da carga.
- As grandezas (corrente e/ou tensão) de sequência zero, também são usadas como indicadores de falhas à terra.
- Outra família de métodos usa a relação entre as componentes simétricas dos fasores de corrente ou tensão da falha.
- Outro método é com base na verificação das relações entre ângulos pós-falta dos fasores das componentes de sequências.

A identificação precisa da fase faltosa é fundamental para o funcionamento correto da proteção da linha de transmissão, particularmente em redes de Extra Alta Tensão (EHV). As

maiores aplicações dos esquemas e algoritmos de seleção de fase incluem (KASZTENNY *et al.*, 2000):

- Supervisão das funções de disparo monopolar e religamento automático (monopolar ou tripolar) para distinguir entre faltas monofásicas à terra e multifásicas fornecendo soluções rápidas e corretas na identificação da fase faltosa.
- Bloqueio de elementos de distância específicos durante algumas falhas devido ao perigo de precisão limitada desses elementos (elementos de distância fase-terra durante faltas bifásicas à terra, por exemplo).
- Identificação do tipo de falta correta para um localizador de falha interna.
- Identificação correta do tipo de falta para direcionamento e relatório de falha.

Os elementos de proteção, como as funções de distância ou sobrecorrente de fase, podem errar ao determinar a fase faltosa para falhas na linha pelas seguintes razões (KASZTENNY *et al.*, 2000):

- Quando ocorre uma falha, os elementos que respondem com maior velocidade podem errar ao identificar o tipo de falha. Isso poderia ser resolvido aumentando o tempo da saída do disparo (digital), mas isso é indesejável.
- Os elementos de proteção podem operar imprudentemente devido a deficiências em seu desempenho. Por exemplo, alguns elementos de distância de fase podem funcionar mal em faltas monofásicas muito próximas ao ponto de localização do relé.
- Alguns elementos de proteção, como as funções de sobrecorrente direcional (67), o direcional de sequência negativa ou sequência zero, podem ser programados para desligar a linha, mas não têm a capacidade de identificar o tipo de falha.

Devido a estas condições citadas anteriormente, as funções de classificação e seleção do tipo de falta nos relés de proteção é considerada muito importante.

### 2.3.2 Classificação de Fases com Faltas em Linhas TMO

A classificação e seleção das fases com faltas são funções auxiliares importantes e que devem ser completamente caracterizada, já que são elementos essenciais para a realização de um bom desempenho dos esquemas de proteção e localização de faltas.

Em 2012, (KÜSEL *et al.*, 2012), apresentaram uma análise de estimação de fasores aplicada a sinais de faltas em um modelo de uma linha TMO ponto a ponto de 2600 km,

comprimento elétrico aproximado de  $190^\circ$ , e com tensão nominal de 1000 kV. As simulações foram feitas com o software ATP. Segundo os pesquisadores, no Brasil há várias discussões sobre a transmissão não convencional de longa distância, e muito pouco tem sido feito na área de proteção para este tipo de linhas. As principais conclusões do estudo foram que:

- À medida que o ponto da falta se afasta da barra podem surgir componentes inter ou sub-harmônicos de amplitude elevada, afetando a estimação dos fasores, e, consequentemente, o desempenho de relés de distância convencionais. Isso acontece porque quanto mais distante for localizado o defeito, maiores serão os tempos de propagação das ondas viajantes, o que resulta em transitórios de mais baixa frequência, por exemplo para a linha TMO a frequência das componentes inter-harmônicas é de 58 Hz.
- A multiplicidade das frequências das componentes inter-harmônicas está relacionada com o comportamento da própria linha de transmissão, podendo ser evidenciado pela periodicidade das funções hiperbólicas envolvidas no seu modelo.
- A LT responde como linha de compensação série em função do local do defeito, razão pela qual surgem batimentos. (KÜSEL *et al.*, 2012).

Em 2014, (LOPES *et al.*, 2014) propuseram um algoritmo para localização de faltas em linha TMO. O modelo estudado era de parâmetros distribuídos, de tensão de 1000 kV, e comprimento de 2613 km. A linha foi suposta balanceada e as simulações foram desenvolvidas com o software ATP. As principais conclusões do estudo foram:

- Os métodos convencionais de localização de falta baseado em impedância podem falhar para identificar o ponto de falta, mesmo que o efeito da capacitância shunt da linha tenha sido considerado.
- Um novo algoritmo de localização de faltas baseado em impedância de dois terminais, que considera o modelo de parâmetros distribuídos da linha e a capacitância shunt, pode resolver o problema, identificando confiavelmente as estimações do ponto da falta.
- Este algoritmo é insensível ao tipo de faltas, fluxo de carga, fator de potência e transposição da linha. O pior caso apresentou um erro menor do que 2,2% (*Este valor ainda é muito elevado para a correta identificação do defeito*).

Em 2016 (LOPES *et al.*, 2016), apresenta-se uma análise do desempenho de um algoritmo de localização de falta baseado na teoria de ondas viajantes quando aplicado a linhas com um pouco mais de meio comprimento de onda. Os resultados indicaram que o método é robusto para as características de operação atípica da linha TMO e apresenta boa precisão na estimação do local da falta.

Em 2018 (ESPINOZA; TAVARES, 2018), apresentaram um novo algoritmo para a seleção das fases faltosas em linhas de meio comprimento de onda, e o mesmo foi implementado em um relé microprocessado existente comercialmente. O algoritmo proposto demonstrou um desempenho apropriado para todos os testes realizados, sendo que a percentagem total de operações não esperadas foi menor do que 1%. O modelo da linha analisada foi de parâmetros distribuídos com capacitância em derivação (Shunt), completamente transposta, de tensão de 1000 kV, e comprimento de 2600 km. O modelo foi testado através do RTDS na configuração de hardware-on-the-loop, sendo que os principais resultados mostraram que:

- Os algoritmos de seleção da fase faltosa, baseado em componentes simétricas usados nas funções de distância dos relés convencionais não trabalham corretamente quando aplicado a linha TMO. Isso ocorre porque os algoritmos dos seletores de fases baseados em fasores são desenvolvidos para modelos de linhas curtas.
- O método proposto opera no domínio da frequência (fasores) usando valores incrementais de tensões e correntes para determinar a variação da impedância aparente no momento da ocorrência da falta.
- Devido às limitações do relé testado, não foi possível a implementação do algoritmo na função de distância.

Em (SHI *et al.*, 2018), é proposto um seletor de fases no domínio do tempo, baseado na transformada wavelet que calcula a onda viajante reversa de corrente. Mediante a aplicação das transformadas de Clarke, obtém-se o módulo máximo da componente transitória da transformada wavelet, e com esta informação, determina-se o tipo de falta.

Em (LIU *et al.*, 2018), é apresentado um esquema de seleção de fase sob falta, no domínio do tempo. Seu funcionamento ocorre através das amostras de tensão e corrente da falta, vista de uma extremidade da linha. Este método é baseado, no princípio de superposição e, como o apresentado em (ESPINOZA; TAVARES, 2018), assume que o circuito é linear no momento da falta. O algoritmo calcula e compara a tensão fase-fase no local do relé para faltas na linha.

## 2.4 Componentes de Clarke

Em análise modal, os sinais no domínio das fase são combinações lineares dos sinais no domínio dos modos, e vice-versa. Estas combinações lineares são expressas por matrizes de transformação linear (KASZTENNY *et al.*, 2016).

$$\hat{I}_{modo} = \bar{T}_i^{-1} \cdot \hat{I}_{fase} \quad (2.2)$$

$$\hat{V}_{modo} = \bar{T}_v^{-1} \cdot \hat{V}_{fase} \quad (2.3)$$

Existem diferentes tipos de transformações modais, por exemplo, para avaliar uma condição de desbalanço num sistema trifásico de CA convencional, normalmente usamos a transformação em componentes simétricas, apresentado por Fortescue (FORTESCUE, 1918) (também conhecido por transformação de Fortescue). Em uma linha TMO, o método das componentes simétricas pode levar a classificação de falha e o cálculo da impedância aparente vista pelo relé de forma errada, já que as componentes simétricas não discriminam adequadamente, em algumas regiões, o que está acontecendo na linha TMO. À medida que o local de defeito se afasta da fonte em direção ao meio da linha, o comportamento ante falta é inteiramente diferente do de uma linha convencional, motivo pela qual as unidades de classificação e seleção de fases dos relés comerciais não têm um bom desempenho. É por isso que nesta pesquisa optamos por avaliar o comportamento da TMO ante faltas desbalanceadas mediante outra transformação de coordenadas, especificamente as componentes de Clarke, também conhecidas como componentes alfa, beta e zero (CLARKE, 1943).

As componentes de Clarke não são rotineiramente utilizadas nos sistemas de proteção tradicional devido ao bom desempenho das componentes simétricas. Entretanto, com o surgimento dos esquemas de proteção baseado no domínio do tempo, as componentes de Clarke estão sendo usadas majoritariamente para classificação, seleção e cálculo da distância à falta em linhas convencionais, sendo que as mesmas podem trabalhar com sinais instantâneos de corrente e tensões.

Para um sistema trifásico, tendo como referência a fase A, as componentes alfa, beta e zero das correntes e tensões são definidas conforme apresentado (CLARKE, 1943):

- As componentes alfa das fases B e C são iguais, opostas em sinal à fase A e possuem a metade da magnitude da componente da fase A.
- As componentes beta nas fases B e C são iguais e opostas em sinal e a componente da fase A é igual a zero.
- As componentes zero são iguais nas três fases.

Analisando de outra forma, podemos entender que:

- A componente  $\alpha$  da corrente flui num sistema trifásico pela fase A e retorna uma metade pela fase B e outra metade pela fase C.
- As componentes  $\beta$  são correntes circulante nas fases B e C.

- A componente 0 são componentes de sequência zero (similar às componentes zero das componentes simétricas, segundo apresentado na matriz 2.4).

$$\begin{bmatrix} \hat{I}_a^\alpha \\ \hat{I}_a^\beta \\ \hat{I}_a^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{I}_a \\ \hat{I}_b \\ \hat{I}_c \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Na Tabela 2.1 é apresentada a relação entre as correntes das componentes  $\alpha$ ,  $\beta$  e 0 fluindo do sistema para a falta, dependendo do tipo de falta, tomando como referência as fases A, B e C, para o sistema trifásico (CLARKE, 1943), onde não são consideradas as correntes de carga ou de pré-falta. A análise anterior considerou linhas de comprimento convencional e perfeitamente balanceadas.

Tabela 2.1 – Relações entre as componentes de Clarke para faltas em sistemas trifásicos

Tipo de falta	Comportamento das componentes das correntes
ABC	$I_a^0=0$
A-G	$I_a^\beta = 0 \wedge I_a^\alpha = 2 \cdot I_a^0$
B-G	$I_b^\beta = 0 \wedge I_b^\alpha = 2 \cdot I_b^0$
C-G	$I_c^\beta = 0 \wedge I_c^\alpha = 2 \cdot I_c^0$
AB-G	$I_a^\alpha = -I_a^0$
BC-G	$I_b^\alpha = -I_b^0$
CA-G	$I_c^\alpha = -\hat{I}_c^0$
AB	$I_c^\alpha = 0, I_a^0=0$
BC	$I_a^\alpha = 0, I_b^0=0$
CA	$I_b^\alpha = 0, I_c^0=0$

# 3 METODOLOGIA E MATERIAIS

## 3.1 Metodologia

Este trabalho de pesquisa tem como objetivo o desenvolvimento e implementação do algoritmo classificador de fases com falta proposto para uma linha TMO. O algoritmo foi desenvolvido em software através do RSCAD, e implementado em hardware em relé comercial, localizado no extremo emissor, e segundo os passos a seguir:

- Implementação em software
  - Desenvolvimento do modelo do sistema de teste da TMO no ambiente RSCAD.
  - Caracterização do comportamento da TMO ante faltas.
  - Projeto e implementação do algoritmo classificador de faltas no RSCAD.
  - Avaliação do desempenho do algoritmo para as faltas.
  - Obtenção dos arquivos COMTRADE do extremo emissor.
  - Análise dos resultados.
- Implementação em hardware
  - Implementação do sistema de teste da TMO em configuração de malha fechada.
  - Implementação do classificador de fase com falta no relé de proteção.
  - Ajustes das funções de distância no relé de proteção.
  - Obtenção dos resultados dos testes, através de arquivos COMTRADE.
  - Análise dos resultados.

### 3.1.1 Modelo do Sistema Teste

Para verificar o comportamento do algoritmo de classificação de fases sob falta, o sistema de teste avaliado neste trabalho é o representado na figura 3.1 modelado no RTDS. O sistema consiste em uma usina geradora em 15 kV (conectada à subestação de Xingu 2) através de um transformador elevador com a linha de TMO de 800 kV e 2600 km de comprimento. O modelo possui um sistema de proteção contra ressonância, de um transformador abaixador de 800:500 kV, conectado ao sistema equivalente (subestação Nova Iguaçu) para representar o restante do sistema elétrico brasileiro. Para a mitigação das sobretensões produzidas pelas faltas críticas foram instalados *spark gaps* de acordo com (ORTEGA; TAVARES, 2020).

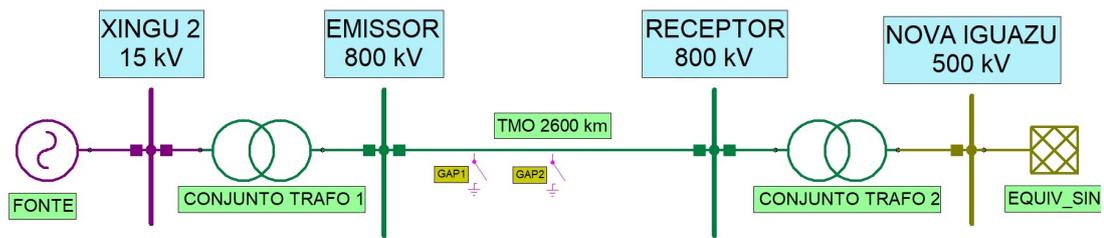


Figura 3.1 – Sistema de Teste

A Tabela 3.1 apresenta os principais parâmetros elétricos da linha de um pouco mais de meio comprimento de onda (ORTEGA; TAVARES, 2020). A potência natural da linha (SIL) é de 4741 MW. A linha foi considerada balanceada e representada com o modelo que considera a dependência dos parâmetros longitudinais com a frequência no domínio das fases.

Tabela 3.1 – Características elétricas da linha TMO. Fonte: (ORTEGA; TAVARES, 2020)

Sequência	Resistência ( $\Omega/\text{km}$ )	Reatância ( $\Omega/\text{km}$ )	Susceptância ( $\mu\text{S}/\text{km}$ )
Positiva/negativa	0,0068	0,1737	9,5367
zero	0,3871	1,3502	4,0660

A Tabela 3.2 apresenta os principais parâmetros dos elementos do sistema de teste, fonte geradora, transformadores e equivalente do sistema brasileiro (ORTEGA; TAVARES, 2020).

Tabela 3.2 – Parâmetros dos elementos do sistema. Fonte: (ORTEGA; TAVARES, 2020)

Equipamento	Potência (MW)	Tensão (kV)	Z1 ( $\Omega$ )	Z0 ( $\Omega$ )
Gerador	5000	15	0,000342+j0,011775	
Equivalente		500	0,4801+j7,2169	7,2169+j36,0840
Transformador	5197,5	15/800	19,4	
Transformador	4500	800/500	16,4	

A Tabela 3.3 apresenta os dados dos elementos supressores de sobretensões (spark gap) instalados em dois pontos da linha TMO, a 1010 km e 1490 km do extremo emissor da linha, os quais atuam somente para faltas bifásicas, bifásicas a terra e trifásicas (ORTEGA; TAVARES, 2020).

Tabela 3.3 – Elementos supressores de sobretensões críticas – Gap. Fonte: (ORTEGA; TAVARES, 2020)

Localização (km)	Tipo	Tensão de operação (pu)	Resistência ( $\Omega$ )
1010	gap	2,30	0,20
1490	gap	2,25	0,20

As equações a seguir, 3.1, 3.2, 3.4 e 3.5, são utilizadas para calcular a impedância característica ( $\bar{Z}_c$ ), potência característica ( $P_c$ ), constante de propagação ( $\bar{\gamma}$ ) de sequência positiva e zero, e o tempo de propagação ( $\tau$ ), associada à linha de meio comprimento de onda, para uma frequência ( $f$ ) de 60 Hz (frequência nominal do sistema brasileiro) (DOMMEL, 1969).

$$\bar{Z}_c = \sqrt{\frac{\bar{Z}}{\bar{Y}}} \quad (3.1)$$

$$P_c = \frac{V_1^2}{Z_c} \quad (3.2)$$

$$\bar{\gamma} = \sqrt{\bar{Z} \cdot \bar{Y}} = \alpha + j\beta \quad (3.3)$$

$$v = \frac{2\pi f}{\beta} \quad (3.4)$$

$$\tau = \frac{l}{\beta} \quad (3.5)$$

A Tabela 3.4 apresenta os valores característicos de impedância, potência característica, atenuação ( $\alpha$ ) e distorção ( $\beta$ )<sup>1</sup> ao longo da linha de comprimento  $l = 2600$  km, velocidade ( $v$ ) e tempo de propagação para a linha TMO, para ambas sequências: positiva e zero. A impedância característica é aproximada pela parcela real.

Tabela 3.4 – Parâmetros da linha TMO analisada.

Sequências	$Z_C$ ( $\Omega$ )	$P_C$ (MW)	$\alpha \cdot l$ (Np)	$\beta \cdot l$ (rad)	$v$ (km/ms)	$\tau$ (ms)
Positiva/negativa	135	4741	0,066	3,347	292,860	8,878
Zero	582	-	0,865	6,153	159,304	16,32

<sup>1</sup> Os mesmos símbolos das componentes de Clarke são normalmente utilizados para identificar as parcelas real e imaginária da constante de propagação da linha de transmissão. Mantivemos a grafia usual, mas fica a ressalva para que o leitor não se confunda.

### 3.1.2 Algoritmo Classificador de Falta Proposto

A metodologia utilizada para a conceitualização e especificação, como também obter os limites de operação do algoritmo classificador de fases faltosas, é a que conhecemos como experimentação. Por meio de estudos de casos, utilizamos o método indutivo, gerando conclusões gerais a partir dos casos particulares simulados. Apresentamos os passos seguidos para o desenvolvimento, testes, avaliação e implementação do algoritmo proposto.

#### 3.1.2.1 Desenvolvimento do Algoritmo

Para realizar o desenvolvimento do algoritmo classificador de fase faltosas os seguintes passos foram implementados:

- Após realizar a modelagem do sistema de teste no RSCAD, o primeiro passo foi realizar diferentes simulações de falta com o objetivo de caracterizar as componentes de Clarke. Os sinais das correntes foram monitorados e extraídos do extremo emissor da linha TMO.
- Uma vez caracterizada as componentes de Clarke, determinamos que a taxa de variação das componentes seria o melhor parâmetro para realizar a classificação da falta. Para calcular a taxa de variação foi usada uma janela de 8 amostras por ciclo de forma similar a um relé de proteção convencional.
- Uma vez desenvolvido o algoritmo, novos conjuntos de faltas foram simuladas para determinar os limiares do algoritmo. Iniciamos considerando que se os limiares propostos cumprem com as condições críticas, como as apresentadas nas zonas de singularidade da linha TMO (ressonância e no meio da linha), os mesmos satisfariam as condições apresentadas fora das zonas críticas.
- Com o algoritmo pronto, foi realizado um conjunto de faltas, para determinar o ângulo de incidência de falta da tensão que apresentava a condição mais crítica para a componente de C.C. da corrente de falta. Foi verificado que um ângulo de incidência de falta de  $90^\circ$  era a condição mais crítica. Também ajustamos o modelo de maneira que para cada tipo de falta, a fase de referência fosse a fase envolvida na falta para faltas monofásicas e para faltas envolvendo duas ou mais fases, fosse a fase de referência.

#### 3.1.2.2 Simulação das Faltas envolvendo uma ou mais fases no Modelo Teste

Com o algoritmo desenvolvido e ajustado, para avaliar o desempenho do classificador de fase proposto baseado nas derivadas das componentes de Clarke para as diferentes condições de falta do modelo de teste da linha de TMO, simulamos dez (10) dos onze (11) tipos de faltas que podem ocorrer em uma linha de transmissão, contemplando vários cenários diferentes:

- Variando a potência transmitida pela linha TMO, para carga nominal, meia carga e em vazio (1,0 SIL; 0,5 SIL e 0 SIL).
- Variando a resistência da falta em: 0  $\Omega$  , 10  $\Omega$  , 20  $\Omega$  e 100  $\Omega$ .
- Aplicando falta a cada 5% do comprimento da linha, considerando o início no terminal de envio.
- Os testes foram realizados para um ângulo de inserção da falta de 90°.

### 3.1.2.3 Avaliação do Desempenho do Algoritmo ante Falhas

Uma vez obtidos os resultados das simulações dos diferentes tipos de faltas em formato COMTRADE, analisamos com script desenvolvido em Pandas/Python o desempenho do algoritmo classificador de falta, apresentando em diferentes tipos de gráficos a resposta do algoritmo ante condições de falta.

### 3.1.2.4 Seletor de Fases Implementado no Relé SEL-421

A implementação do seletor de faltas no relé comercial do fabricante Schweitzer, modelo SEL-421, foi executada usando a área de programação de equações de controle SELOGIC de formato livre associada com a proteção. No relé existem seis grupos de ajustes, sendo que só um grupo ficará ativo por vez. Ao mudar os grupos pode-se ativar uma programação completamente diferente da que correspondia as condições indicadas pelo grupo ativo (SEL, 2001).

As equações de controle SELOGIC de formato livre fornecem personalização avançada do relé. Porém, o relé está limitado a 256 linhas de programação, e a 64 variáveis booleanas (PSV) e matemáticas (PMV) de proteção, para programação em formato livre (SEL, 2001). Considerando essa limitação, foi programado no grupo de ajuste 1 o seletor de fases para detectar faltas trifásicas, monofásicas (AG) e bifásica (BC). Os outros tipos de faltas podem ser programados nos outros grupos de ajustes para opções de teste. Adicionalmente, foram ativadas diferentes palavras lógicas baseadas nos cálculos das componentes de correntes das componentes de Clarke para obter o registro de eventos no instante da falta. O algoritmo implementado no relé de distância SEL-421 para a classificação do tipo de falta é apresentado no Apêndice B.

### 3.1.3 Ajustes das Funções de Distância das Proteções

As funções de distância dos relés de ambos extremos usados para proteção da linha TMO foram ajustadas para ter um alcance de 90% para zona 1 (Z1) e de 120% para a zona 2 (Z2), sendo que tempo de atuação da zona 1 foi ajustado para atuação instantânea, isto é, sem retardo de tempo intencional. Já para a zona 2 (Z2) o tempo de atuação foi ajustado para 150 ms.

Esses ajustes permitiram definir a característica de operação e implementar o esquema de proteção de distância assistido por comunicação para que os relés possam detectar os diferentes tipos de falta na linha TMO, e iniciar a captura das oscilografias dos eventos, para seu posterior uso e avaliação.

Na Tabela 3.5, são apresentados os ajustes das proteções para o modelo de prova do sistema em estudo, sendo que o ajuste de distância máximo permitido pelos relés é de 64  $\Omega$ /secundários.

Tabela 3.5 – Ajustes dos relés de distância.

Parâmetro	Valor
Tensão Fase-Fase Nominal	800 [kV]
Corrente Nominal	700 [A]
Frequência Nominal	60 [Hz]
Comprimento da Linha	2600 [km]
Impedância Primária da Linha	451,97[ $\Omega$ ]
RTP	6956,5:1
RTC	700:1
K	0,101
Impedância Secundária Seq. +	45,89 [ $\Omega$ ]
Impedância Secundária Seq. 0	255,0 [ $\Omega$ ]
Alcance Zona 1	41,30 [ $\Omega$ ] (90%)
Alcance Zona 2	55,07 [ $\Omega$ ] (120%)
K0M1	1,462

## 3.2 Materiais

Nesta seção apresentaremos uma breve descrição dos materiais e ferramentas necessários para realizar as simulações, obter os resultados e o porque do seu uso.

### 3.2.1 Simulador Digital em Tempo Real - RTDS

Este equipamento foi desenvolvido para realizar estudos em tempo real de fenômenos transitórios eletromagnéticos em sistemas elétricos de potência. Uma de suas aplicações é a realização de testes em malha fechada. Desta forma, dispositivos de controle e proteção são conectados ao RTDS através de amplificadores de sinais para interações com simulações em sistemas elétricos de potência. O RTDS é constituído de hardware e software, e ambos só funcionam em conjunto.

O RTDS foi usado em primeiro lugar para aproveitar alguns algoritmos que já estavam disponíveis como resultado de trabalhos anteriores de outros pesquisadores do laboratório

de transitórios, e também porque tínhamos o interesse fazer uso do equipamento na aplicação futura de teste na configuração “hardware in the loop”.

A Figura 3.2 apresenta a configuração física da conexão do RTDS em malha fechada conectada aos amplificadores DOBLE, e estes ligados aos relés de proteção.

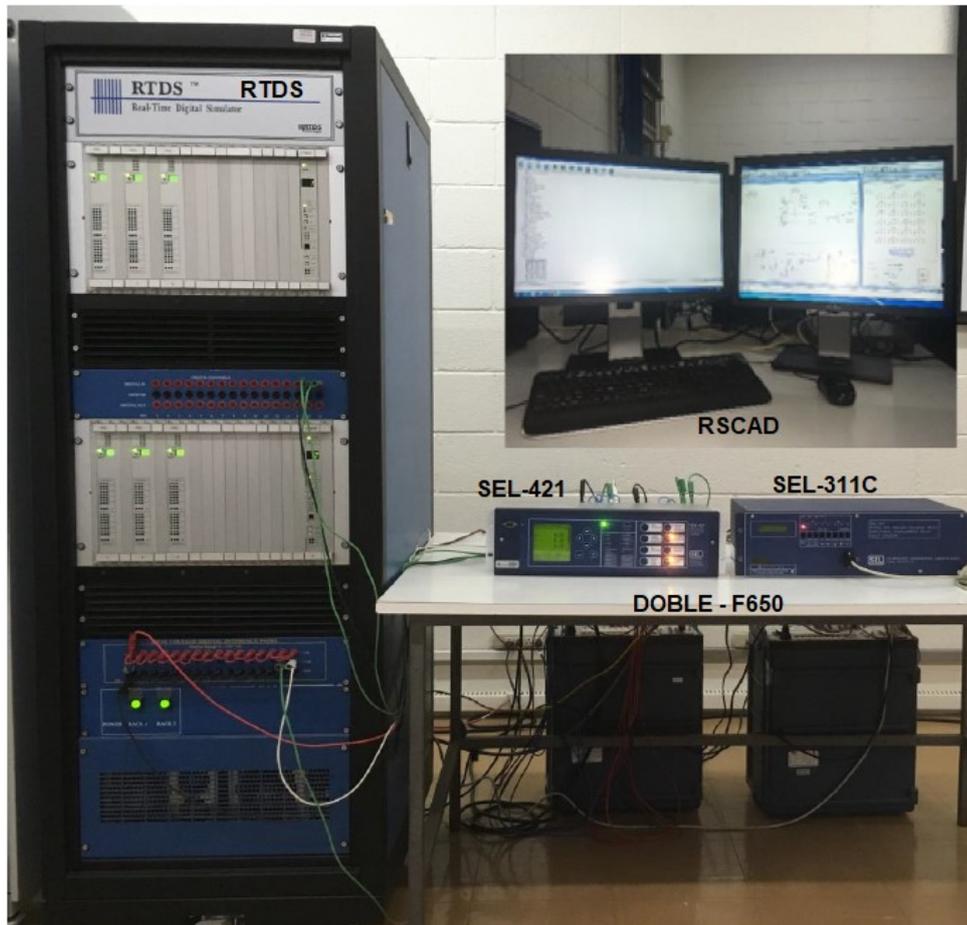


Figura 3.2 – Sistema de teste HIL - Equipamentos utilizados.

### 3.2.2 RSCAD - RTDS

Através do diretório de casos, no módulo de gestão de arquivos, o RSCAD permite criar um novo projeto. Logo depois usando o módulo do software Draft, criamos nosso sistema de teste usando as diferentes bibliotecas de componentes do software. Uma vez tenhamos o sistema modelado, ele é compilado para gerar o código executável, e finalmente simulamos o caso usando o módulo Runtime, conforme apresentado na Figura 3.3, e geramos os resultados em formato COMTRADE.

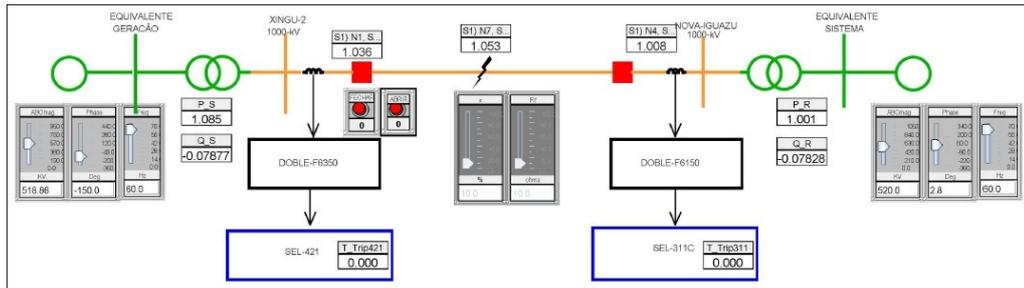


Figura 3.3 – Sistema de teste no módulo Runtime.

### 3.2.3 Caixas de Testes - Doble F-635e

Amplificador externo que permite injetar os sinais de tensão e corrente obtidas em formato digital do RTDS para formato analógico nos relés de proteção. A Figura 3.4 apresenta a janela de configuração dos amplificadores através do pacote de software de proteção.

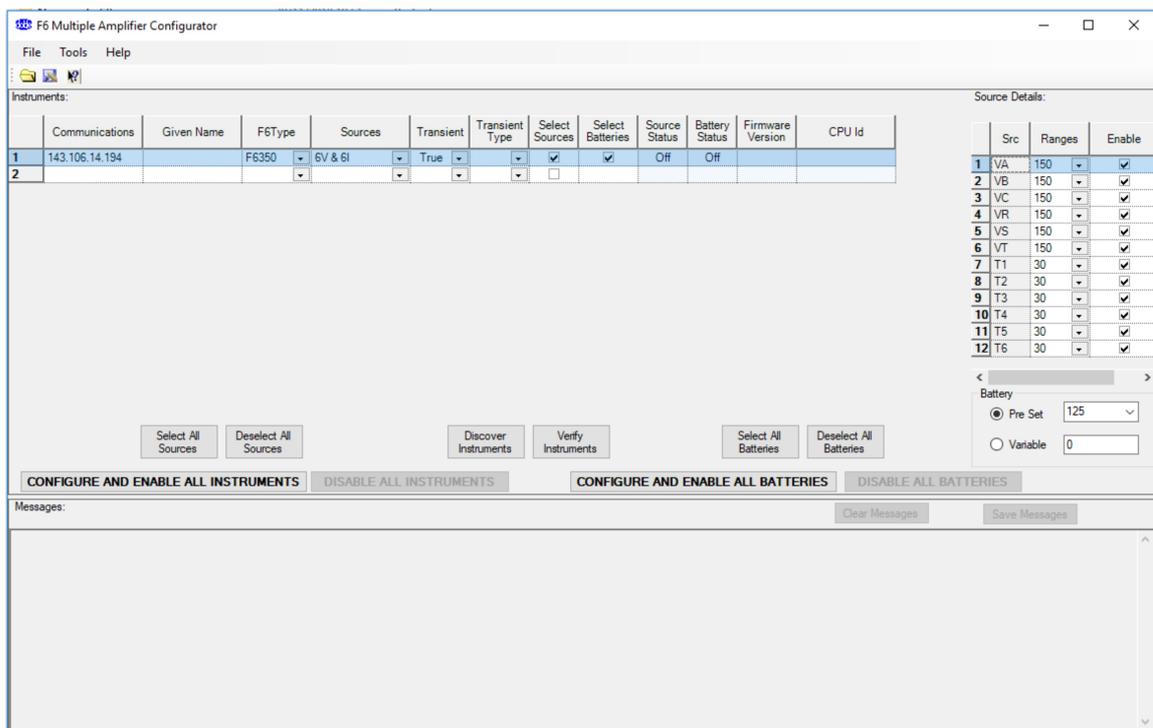


Figura 3.4 – Software de configuração da caixa de teste.

### 3.2.4 Equipamentos de Proteção, Comunicação e Controle SEL

As proteções de distância, em cada extremo da linha TMO, permitem detectar condições anormais de operação do sistema e obter arquivos oscilográficos da falta em formato COMTRADE.

O relé de Proteção de Linha SEL-421: é um sistema de proteção, automatização e controle, para linhas de transmissão baseado em microprocessador. O equipamento possui

cinco (5) zonas de proteção e pode ser usado para esquemas de disparo monopolar e tripolar, em linhas compensadas ou linhas não compensadas. Tem uma amostragem de alta velocidade (8 kHz) e a saída COMTRADE proporciona uma avançada oscilografia. A estampa do tempo da oscilografia pode ter precisão de 10  $\mu$ s.

### 3.2.5 Ferramenta de Software para Análise - Python

Python é uma linguagem de programação de alto nível, criada por Guido Van Rossum em 1991. Ela é usada em ciência de dados, aprendizado de máquinas, e desenvolvimento de software em geral. Em conjunto com suas bibliotecas pandas, numpy e matplotlib, permite a construção de aplicações de análises de dados.

- Numpy: Abreviatura de Numerical Python, é um pacote fundamental para computação científica em python, proporciona um objeto array multidimensional, vários objetos derivados (como arrays e matrizes mascarados) e uma variedade de rotinas para operações rápidas em arrays, incluindo matemática, lógica, manipulação de formas, classificação, seleção, transformada discreta de Fourier, álgebra linear básica, operações estatísticas básicas, simulação aleatória e muito mais.
- Pandas: Oferece estruturas de dados de alto nível e funções, projetadas para facilitar o trabalho com dados estruturados e tabulares. Os seus principais objetos são o Dataframe e as séries.
- Matplotlib: É uma poderosa biblioteca de visualização Python. Ele fornece funções para criar gráficos que se adaptam a todos os tipos de conjuntos de dados e permite uma personalização muito profunda, oferecendo controle total das propriedades de seus gráficos.

### 3.2.6 Padrão para Intercâmbio da Informação - COMTRADE

A norma IEEE C37.111-1999, define o formato para arquivos contendo as formas de ondas transitórias (oscilografias) e dados dos eventos obtidos do sistema no momento de uma falta. Desta forma é fácil interpretar e manipular dados de faltas, testes e simulações.

Cada registro COMTRADE tem um conjunto de até quatro (4) arquivos, como mostrado na Figura 3.5, que apresenta exemplos de três dos arquivos para intercâmbio da informação. Os quatro podem ser descritos como:

- Cabeçalho: Arquivo opcional de texto (ASCII), é criado por quem origina o arquivo.
- Configuração: Arquivo de texto (ASCII), com extensão \*.CFG contém informação necessária para a interpretação adequada dos dados, contidos no arquivo com extensão \*.DAT

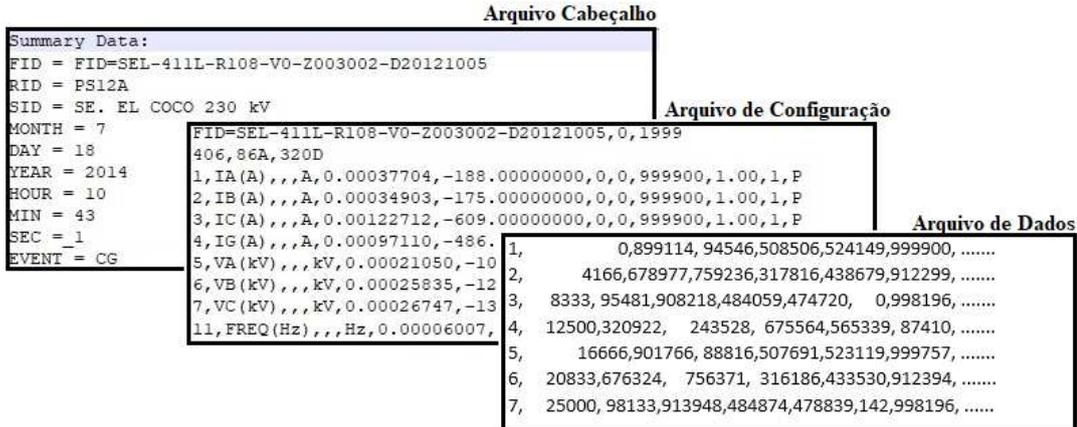


Figura 3.5 – Padrão IEEE para intercâmbio de dados transitórios.

- **Dados:** Pode estar em qualquer formato, ASCII ou binário, e contém os valores de cada amostra do registro para cada canal de entrada.
- **Informação:** É um arquivo opcional, contendo informação extra e mínima requerida para aplicação no conjunto de dados.

# 4 ALGORITMO PROPOSTO PARA TMO

A seguir apresentamos as premissas utilizadas no desenvolvimento de um novo classificador de fases sob falta para os diferentes tipos de faltas simulados no sistema teste da TMO.

- O seletor de fases compara a taxa de variação (derivadas no tempo) das magnitudes das componentes de Clarke das correntes para determinar as fases envolvidas na falta. É preciso obter as componentes de Clarke referidas para cada fase (três ternos de fasores) (CLARKE, 1943).
- O algoritmo deve ser imune às condições de carga, resistência de falta, componente C.C. da corrente de falta e os transitórios de energização e religamento tripolar da TMO.
- O algoritmo seletor da fase com falta deve ter um excelente desempenho para determinar a fase faltosa em todas as condições de faltas avaliadas no modelo, sendo que o desempenho desejado deverá ser igual ou superior a 95%.
- A porcentagem do desempenho do seletor de fase com falta é baseada na relação da diferença da quantidade de testes realizados, menos a quantidade dos testes corretos, entre o total de teste realizado, dado pela equação 4.1 apresentada a seguir:

$$D = \frac{\text{No. Testes Realizados} - \text{No. de Testes Corretos}}{\text{No. Testes Realizados}} \times 100 \quad (4.1)$$

Sendo  $D$  o desempenho em porcentagem.

- No caso do teste, inicialmente considera-se que a linha TMO está com o carregamento nominal (1,0 SIL) e que o ângulo de inserção da falta é de  $90^\circ$ .
- Utiliza-se o filtro digital cosseno para estimação dos fasores (similar aos usados pelos relés Schweitzer (MAGRIN, 2018)), e é necessário adotar um intervalo de 5 ms para que a magnitude do fasor se estabilize.
- Para a falta monofásica (A-G) e considerando a transformada de Clarke relativa à fase  $A$ , a fase sob defeito apresenta as seguintes condições simultaneamente:
  - A taxa de variação no tempo da magnitude do fasor da componente de sequência zero da corrente ( $dI_a^0/dt$ ) durante o defeito será maior do que zero.

- A derivada da magnitude do fasor da componente beta da corrente da fase faltosa ( $dI_a^\beta/dt$ ) terá uma taxa de variação no tempo nula.

Pode ser verificada na figura 4.1, que a derivada da magnitude do fasor da corrente da componente  $\beta$  da fase A (em azul) apresenta um valor próximo de zero ou nulo, e a derivada da magnitude do fasor da corrente da componente zero (em vermelho) é alta, acima de 10 A/S no início da falta, cumprindo com as condições para que o algoritmo possa classificar o tipo de falta em A-G. Esse comportamento se mantém para faltas ao longo da linha, independentemente da variação da potência transmitida, do ângulo de inserção da falta ou do valor da resistência de falta.

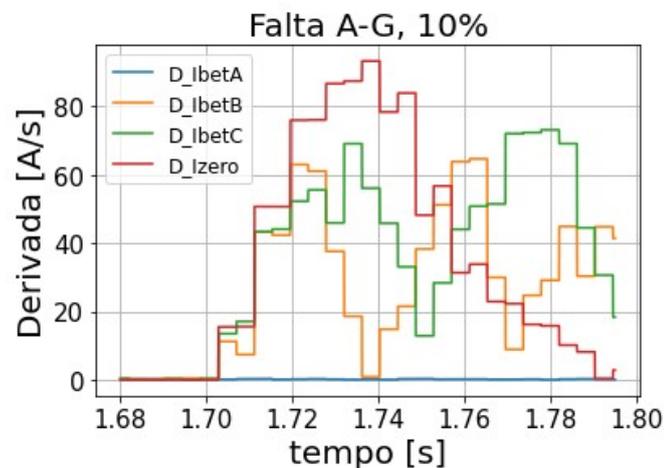


Figura 4.1 – Derivada das magnitudes dos fasores das componentes de Clarke das correntes, falta AG a 10% da TMO - Medidas no terminal emissor.

- Para falta bifásica (BC) as fases faltosas utilizando a transformada de Clarke para a fase A são determinadas com:
  - A taxa de variação da magnitude da componente alfa do fasor da corrente da fase sem falta ( $dI_a^\alpha/dt$ ) terá um valor nulo.
  - A taxa de variação da magnitude da componente zero do fasor da corrente ( $dI_a^0/dt$ ) será igual a zero.

Pode ser verificada na figura 4.2 que a derivada da magnitude da componente alfa do fasor da corrente da fase sem falta, neste caso a fase A (em azul), apresenta um valor bem próximo de zero ou nulo, e a derivada da magnitude da componente zero do fasor da corrente (em vermelho) tem um valor bem próximo de zero ou nulo, cumprindo com as condições para que o algoritmo possa classificar a falta em BC. Esse comportamento se mantém para faltas ao longo da linha.

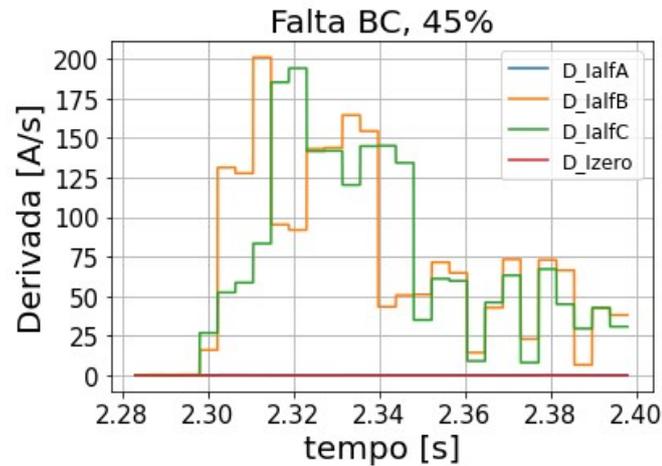


Figura 4.2 – Derivada das magnitudes das componentes de Clarke (referida para a fase *A*) dos fasores das correntes, falta BC a 45% da TMO - Medidas no terminal emissor.

- Para o caso de falta bifásica à terra (BC-G) e utilizando a transformada de Clarke para a fase *A*, a seleção é feita com:
  - As taxas de variações das magnitudes das componentes alfa dos fasores das correntes das fases faltosas ( $dI_b^\alpha/dt$ ) e ( $dI_c^\alpha/dt$ ) serão maiores que zero;
  - a taxa de variação da magnitude da componente zero do fasor de corrente ( $dI_b^0/dt$ ) também será maior que zero.

Pode ser verificada na figura 4.3 que as derivadas das magnitudes das componentes alfa dos fasores das correntes das fases B e C (em verde e laranja) apresentam valores elevados, acima de 50 A/s, e a derivada da magnitude da componente zero do fasor da corrente (em vermelho) tem valor maior do que zero, cumprindo com as condições para que o algoritmo possa classificar a falta em BC-G. Esse comportamento se mantém para faltas ao longo da linha.

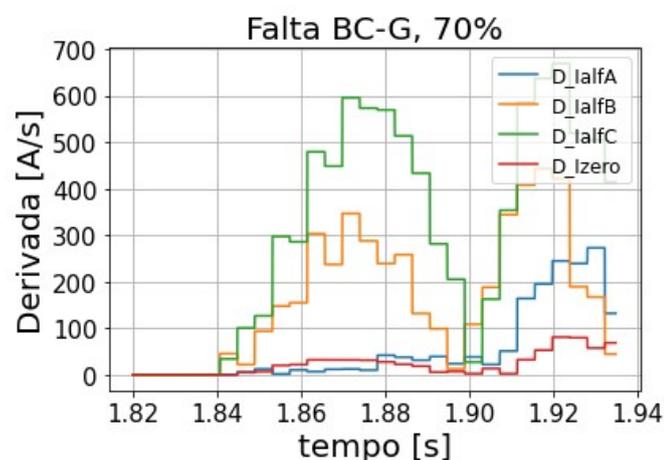


Figura 4.3 – Derivada das magnitudes das componentes de Clarke (referente à fase *A*) dos fasores de correntes, falta BC-G a 70% da TMO - Medidas no terminal emissor.

- Para as faltas trifásicas (ABC) tem-se:
  - a taxa de variação das magnitudes das componentes alfa ( $dI_f^\alpha/dt$ ) e beta ( $dI_f^\beta/dt$ ) dos fasores de corrente diferem de zero para todas as fases ( $f$ ) de referência.
  - a taxa de variação das magnitudes da componente zero dos fasores das correntes ( $dI_f^0/dt$ ) são nulas.

Pode ser verificado na figura 4.4, que as derivadas das magnitudes das componentes  $\alpha$  dos fasores das correntes das fases A, B e C (em azul, verde e laranja) apresentam valores acima de 200 A/s, e a derivada da magnitude da componente zero do fasor da corrente (em vermelho) tem valor bem próximo de zero ou nulo, cumprindo com as condições para que o algoritmo possa classificar a falta em ABC. Esse comportamento se mantém para faltas ao longo da linha.

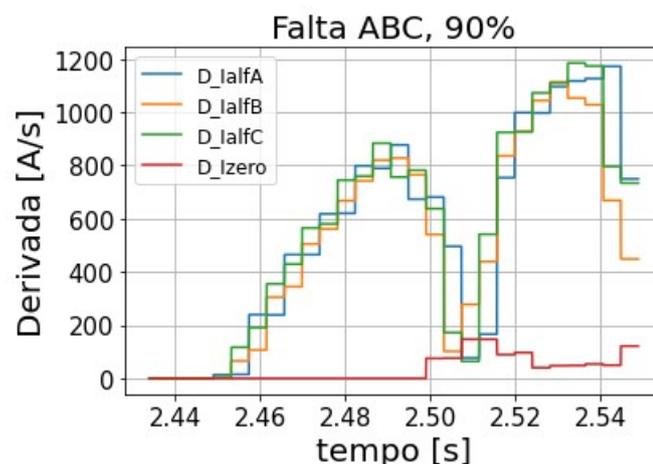


Figura 4.4 – Derivada das magnitudes das componentes de Clarke dos fasores das correntes, falta ABC a 70% da TMO - Medidas no terminal emissor.

Para resumir o algoritmo proposto, a Tabela 4.1 apresenta a caracterização para o classificador de fases faltosas baseado nas componentes de Clarke para o sistema teste da TMO, considerando o exposto acima. H significa a componente maior que zero (valor alto) e L a componente igual a zero (valor baixo). Foram analisados os diferentes tipos de falhas ao longo da linha de forma a definir os valores limiares que permitiram o funcionamento do algoritmo para todos os cenários em estudo, devendo ser efetuados os ajustes dos limiares em função do sistema a proteger. No caso em estudo, valores menores a 0,5 indicam estado baixo (apagado ou zero) e valores acima de 10 indicam estado alto (ativado) para faltas monofásicas, bifásicas e trifásicas. Para faltas bifásicas com terra foi preciso definir um limiar de 50 para o estado ativo, de maneira a garantir a operação do algoritmo.

Tabela 4.1 – Caracterização do classificador de tipo de falha pelas derivadas das magnitudes das componentes de Clarke dos fasores de corrente.

Tipo de falha	Derivadas das magnitudes	Fase de referência	Limiar
A-G	$dI_a^\beta/dt-L, dI_a^0/dt-H$	A	$H>10, L<0,5$
B-G	$dI_b^\beta/dt-L, dI_b^0/dt-H$	B	$H>10, L<0,5$
C-G	$dI_c^\beta/dt-L, dI_c^0/dt-H$	C	$H>10, L<0,5$
AB-G	$dI_{a,b}^\alpha/dt-H, dI_a^0/dt-H$	C	$H(\alpha, \beta)>50, H(0)>10$
BC-G	$dI_{b,c}^\alpha/dt-H, dI_b^0/dt-H$	A	$H(\alpha, \beta)>50, H(0)>10$
CA-G	$dI_{c,a}^\alpha/dt-H, dI_c^0/dt-H$	B	$H(\alpha, \beta)>50, H(0)>10$
AB	$I_c^{\alpha,0}/dt-L$	C	$L<0,5$
BC	$dI_a^{\alpha,0}/dt-L$	A	$L<0,5$
CA	$dI_b^{\alpha,0}/dt-L$	B	$L<0,5$
ABC	$dI_f^{\alpha,\beta}/dt-H$	A,B,C	$H>10$

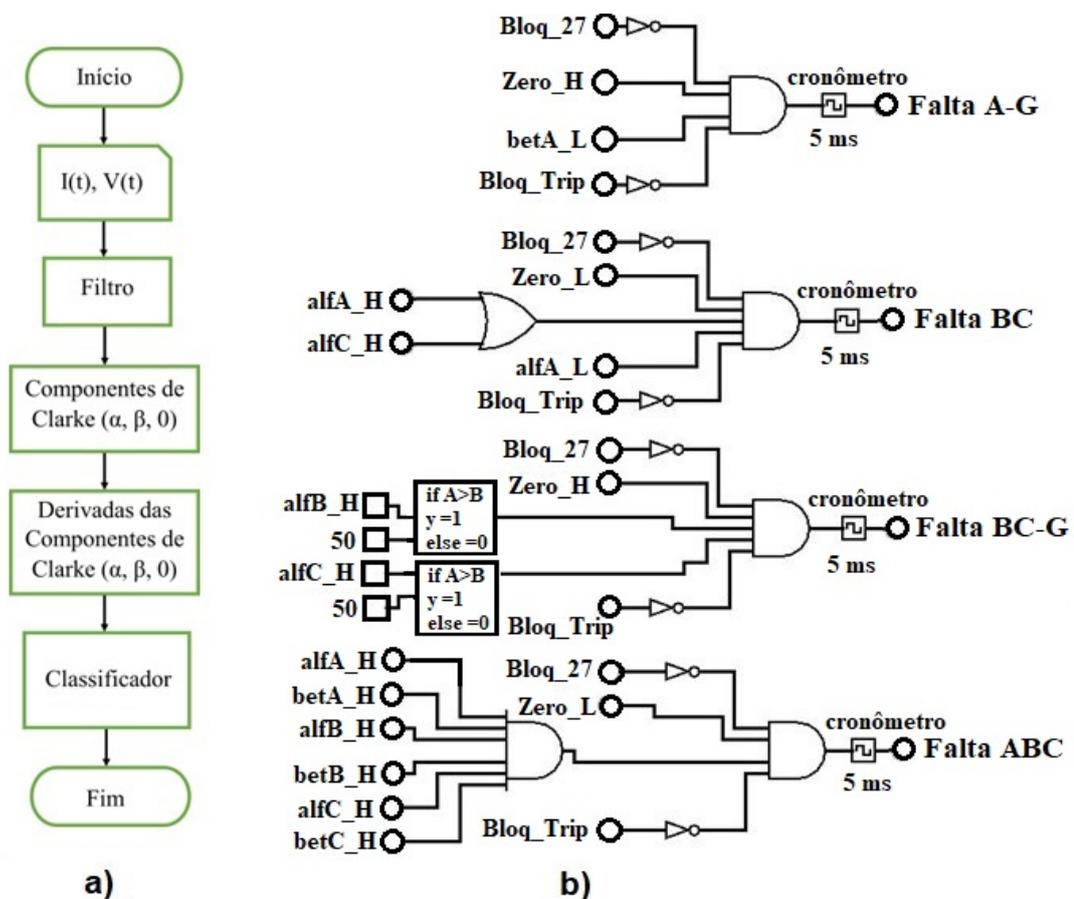


Figura 4.5 – Fluxograma do algoritmo proposto (a) e algoritmo implementado no RTDS (b).

Na Figura 4.5, parte a) apresentamos o fluxograma geral do algoritmo desenvolvido segundo as premissas e a caracterização das derivadas das magnitudes das componentes de Clarke dos fasores das correntes apresentada na Tabela 4.1. Já na parte b), temos a implementação do algoritmo de seleção de fases proposto para a identificação das fases faltosas dos

diferentes tipos de faltas no hardware do RTDS. Excetuando a transformação analógico/digital (A/D), todo o processo de extração do fasor foi reproduzido como o executado num relé comercial, incluindo o uso de taxa de amostragem convencional (32 amostras/ciclo). Desta forma, entendemos que o teste realizado consiste em simulação digital em tempo real do tipo Teste em Malha Fechada com hardware.

Para um sistema trifásico, tendo como referência a fase A, as componentes alfa, beta e zero das correntes (e tensões) são definidas conforme apresentado (CLARKE, 1943):

- As componentes alfa associadas às fases B e C são iguais, opostas em sinal à fase A e possuem a metade da magnitude da componente da fase A.
- As componentes beta nas fases B e C são iguais e opostas em sinal e a componente da fase A é igual a zero.
- As componentes zero são iguais nas três fases.

Considerando as premissas anteriores, as componentes de Clarke ( $\alpha$ ,  $\beta$  e 0) serão calculadas baseada na multiplicação dos fasores, obtidos da filtragem dos sinais das correntes medidas no terminal inicial da TMO, pela matriz de transformação inversa de Clarke referidas a cada fase. Conforme à equação 4.2, tomando como referência a fase A, (CLARKE, 1943).

$$\begin{bmatrix} \hat{I}_a^\alpha \\ \hat{I}_a^\beta \\ \hat{I}_a^0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ 0 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{I}_a \\ \hat{I}_b \\ \hat{I}_c \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Em (CLARKE, 1943), apresentam-se os três conjuntos das matrizes das componentes de Clarke, referenciadas às fases A, B, e C, para descrever os diferentes tipos de faltas. Baseado no método de superposição, podemos distinguir duas componentes para analisar: as componentes de pré-falta em regime permanente, e as componentes de falta em regime transitório. Por exemplo, considerando uma falta monofásica a terra da fase A, no período antes da falta, regime permanente, as componentes alfa e beta são iguais em magnitude à corrente de carga. No instante da falta, período transitório, falta monofásica A-G, a componente beta não é excitada porque as correntes das fases B e C são iguais a zero. Aplicando a matriz de transformação de Clarke referenciada à fase A, conforme a equação 4.2, temos que a componente  $\beta$  é igual a zero.

Para as faltas que envolvem terra, a componente 0 será sempre diferente de zero. Voltando ao método de superposição, a componente  $\beta$  é igual à somatória da componente em ambos períodos, permanente e transitório, resultando igual à corrente de carga (constante), e sua derivada sendo igual à zero.

Na ocorrência de uma falta bifásica BC, e analisando as componentes das correntes, com a equação 4.2, temos que no instante da falta a componente 0 será igual a zero, pois temos que  $\hat{I}_a$  é igual a zero,  $\hat{I}_b$  e  $\hat{I}_c$  são iguais em magnitude e opostos em fase. A componente alfa no instante da falta é igual à componente zero, sendo igual ambas a zero.

Na Tabela 4.2 é apresentado o classificador de faltas utilizando as magnitudes das componentes  $\alpha$ ,  $\beta$  e 0 dos fasores das correntes tomando como referência as fases A, B, e C, para o sistema de TMO. Esta análise difere da apresentada em (CLARKE, 1943) onde foi utilizada somente a transformada de Clarke tomando como referência a fase A, e não foram consideradas as correntes de carga ou de pré-falta. A análise anterior considerou linhas de comprimento convencional e perfeitamente balanceadas.

Tabela 4.2 – Relações entre as magnitudes das componentes de Clarke dos fasores de corrente para classificar as faltas em sistemas trifásicos com carga

Tipo de falta	Equação das componentes das correntes
ABC	$I_a^\alpha = I_b^\alpha = I_c^\alpha > 0$ $I_a^\beta = I_b^\beta = I_c^\beta > 0$ $I_a^0 = I_b^0 = I_c^0 = 0$
A-G	$I_a^\beta = I_{carga}, I_a^0 > 0$
B-G	$I_b^\beta = I_{carga}, I_b^0 > 0$
C-G	$I_c^\beta = I_{carga}, I_c^0 > 0$
AB-G	$I_a^\alpha = I_b^\alpha = I_c^\beta > 0$
BC-G	$I_b^\alpha = I_c^\alpha = I_a^\beta > 0$
CA-G	$I_c^\alpha = I_a^\alpha = I_b^\beta > 0$
AB	$I_c^\alpha = I_{carga}, I_c^0 = 0$
BC	$I_a^\alpha = I_{carga}, I_a^0 = 0$
CA	$I_b^\alpha = I_{carga}, I_b^0 = 0$

Para visualizar o comportamento das magnitudes das componentes de Clarke das correntes, na Figura 4.6 é apresentada uma falta monofásica (AG) a 50% da linha TMO, com resistência de falta de 100  $\Omega$ , e transmitindo 1,0 SIL. No momento da falta a corrente da fase B aumenta e as correntes das fases A e C diminuem. Se a análise fosse feita baseada na análise das componentes simétricas, um seletor convencional poderia identificar de forma errada a fase faltosa. Por outro lado, avaliando as componentes de Clarke, o algoritmo proposto identifica a falta de forma correta, baseado na Tabela 4.2, uma vez que a componente beta da fase em falta se mantém constante e a componente zero se eleva para um valor superior a zero, caracterizando uma falta A-G.

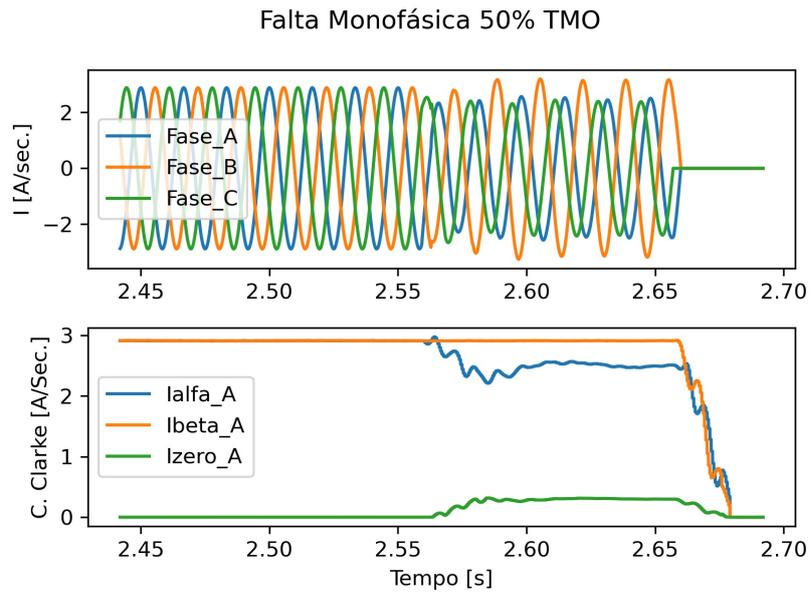


Figura 4.6 – Falta AG a 50% da linha TMO - Medição no terminal emissor - Magnitude das componentes de Clarke dos fasores das correntes (referente a fase A).

## 5 RESULTADOS

### 5.1 Comportamento do Sistema Teste sob Falhas

Para avaliação do comportamento do sistema de teste sob falhas, foram realizadas dez (10) tipos de diferentes simulações de curto circuito (monofásicos, bifásicos, bifásicos a terra e trifásicos) ao longo da linha TMO. As simulações foram feitas a cada 5% da linha, variando-se a resistência da falta, e o nível de carga da linha. Os sinais de tensões e correntes de falta foram medidos nos dois extremos da linha, sendo os resultados obtidos em arquivos com formato COMTRADE para posterior avaliação.

Na Figura 5.1, apresentamos os gráficos das formas de onda das correntes medidas no terminal de envio para falta monofásica A-G a 25, 50, 75, e 98% do comprimento da linha TMO, com resistência de falta de  $10 \Omega$ , 1 SIL de carga e ângulo de inserção de  $90^\circ$ . Pode-se observar o comportamento atípico da TMO sob falta, onde a magnitude da corrente da fase A, fase faltosa, no instante da falta é menor do que o seu valor de pré-falta para as condições de falta a 25% e 50%. Especificamente, faltas próximas a 50% apresentam uma resposta com característica de alta impedância para a unidade de medida da fase A-G do relé localizado no extremo emissor. Um relé comercial não consegue identificar o tipo de defeito nesta situação,

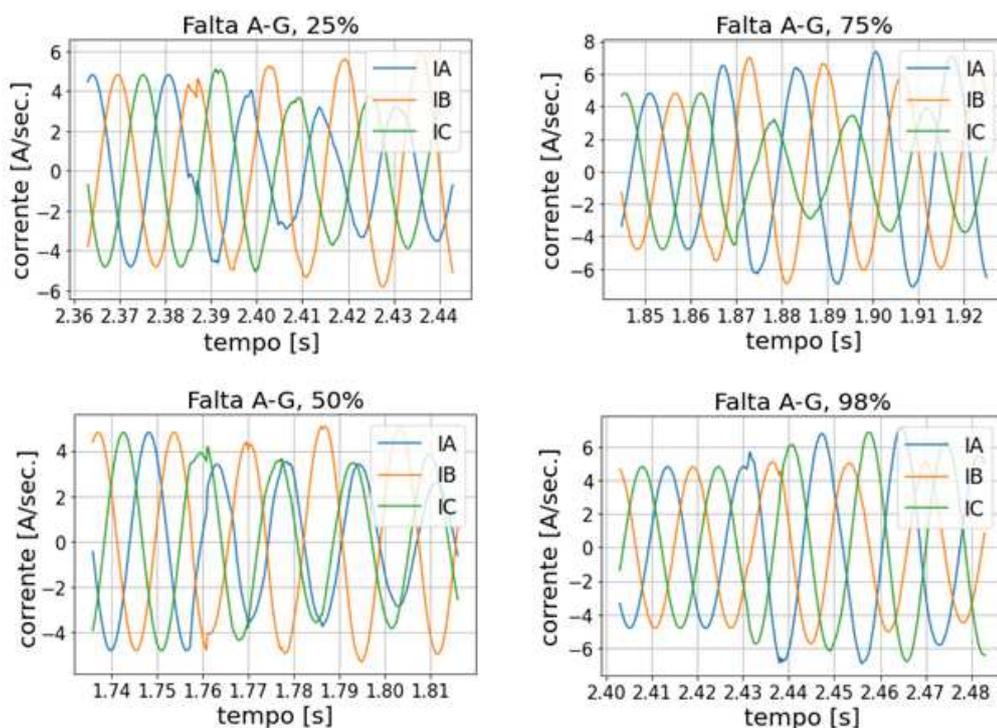


Figura 5.1 – Formas de onda das correntes secundárias de fase para falta A-G a 25, 50, 75, e 98% do terminal local - Medição no terminal local.

portanto, não emite o sinal de disparo (*trip*). Por outro lado, as faltas ocorridas além do centro da linha, mais próximo do extremo receptor, apresentam magnitudes de correntes de faltas das duas fases, incluindo a fase faltosa, superiores à corrente de carga, o que é entendido pelo extremo emissor como uma falta bifásica à terra.

O plano de impedância R-X é uma ferramenta muito útil para o engenheiro de proteção, permitindo, neste caso, visualizar as características de operação das funções de distância da proteção da linha e observar o comportamento do lugar da impedância aparente vista pelo relé no momento da falta. A Figura 5.2, apresenta a trajetória do lugar da impedância aparente vista do extremo emissor para a falta monofásica A-G a 25% com uma resistência de falta de  $10 \Omega$ . Esta trajetória foi calculada usando a equação 5.1 que é derivada das componentes simétricas (COOK, 1985). Observa-se que a impedância aparente  $Z_{AG}$  permanece fora das características de operação da zona 1, e da zona 2, ajustadas para 90% e 120% da impedância de sequência positiva da TMO, em relé comerciais, respectivamente. Para as faltas nas regiões de ressonância, assim como também para a região central da TMO, a resposta vista desde o terminal de envio é de alta impedância.

$$Z_{AG} = \frac{V_{AG}}{I_{AG}(1 + k_0)} \quad (5.1)$$

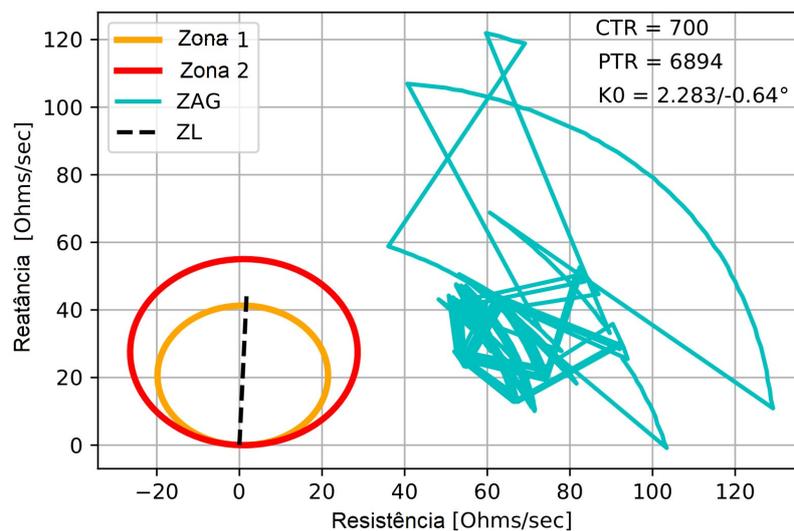


Figura 5.2 – Lugar da impedância falta A-G a 25% vista do extremo de envio.

## 5.2 Desempenho do classificador de faltas

Para essa pesquisa, o classificador de faltas foi codificado somente no relé localizado na extremidade de envio da linha TMO. No terminal remoto o relé utilizado não tinha área

de código. O algoritmo foi codificado no RTDS que recebeu os fasores das correntes em valores primários. Como será visto, a resposta do extremo remoto é semelhante à do terminal local.

### 5.2.1 Faltas Monofásicas

Na Figura 5.3 são apresentadas as magnitudes das componentes beta e zero dos fasores das correntes, em amperes primários, vista desde o extremo receptor, para uma falta monofásica da fase A a 25, 50, 75, e 95% da TMO, com resistência de falta de  $10 \Omega$ , ângulo de inserção da falta de  $90^\circ$  e 1,0 SIL. Os gráficos foram gerados de arquivos COMTRADE obtidos do relé comercial SEL-311C. Pode-se observar que para este tipo de falta a magnitude da componente beta do fasor da corrente da fase A, envolvida no defeito, é constante e igual à corrente de pré-falta (corrente de carga), e a magnitude da componente zero do fasor da corrente não é nula, sendo o seu comportamento similar ao do observado no extremo emissor, quando comparado à da figura 5.4. Podemos então afirmar, com base nestes resultados, que o algoritmo classificador localizado no extremo receptor, terá um desempenho semelhante do extremo emissor, ou seja, não há interferência no sentido do fluxo de potência.

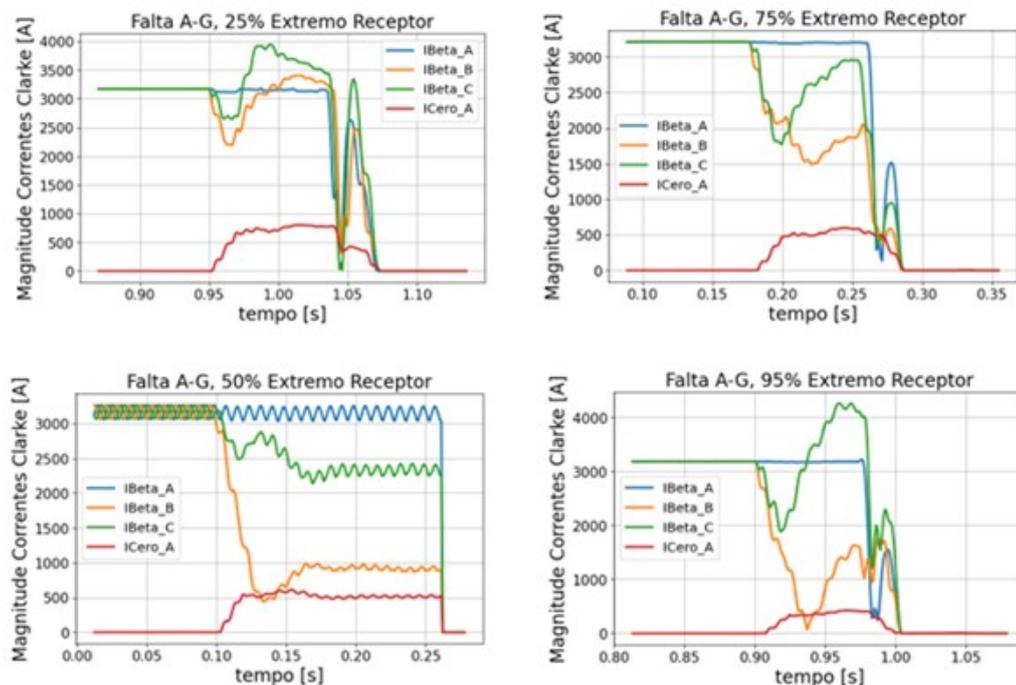


Figura 5.3 – Magnitudes das componentes beta e zero dos fasores das correntes para falta A-G a 25, 50, 75, e 95% vista do extremo receptor - Medição no terminal receptor.

Na Figura 5.4 é apresentado o comportamento das magnitudes das componentes beta dos fasores das correntes em amperes secundários, para faltas monofásicas A-G a 25, 50, 75, e 98% da linha vista do terminal emissor, com resistência de falta de  $10 \Omega$ , 1,0 SIL de carga e ângulo de injeção de  $90^\circ$ . Pode-se observar que a magnitude da componente beta do fasor da corrente da fase faltosa é constante e igual à da corrente de pré-falta (carga). Além disso, a

magnitude da componente zero do fasor da corrente é maior do que zero no momento da falta. Este comportamento se repete para faltas monofásicas ao longo de toda a linha TMO.

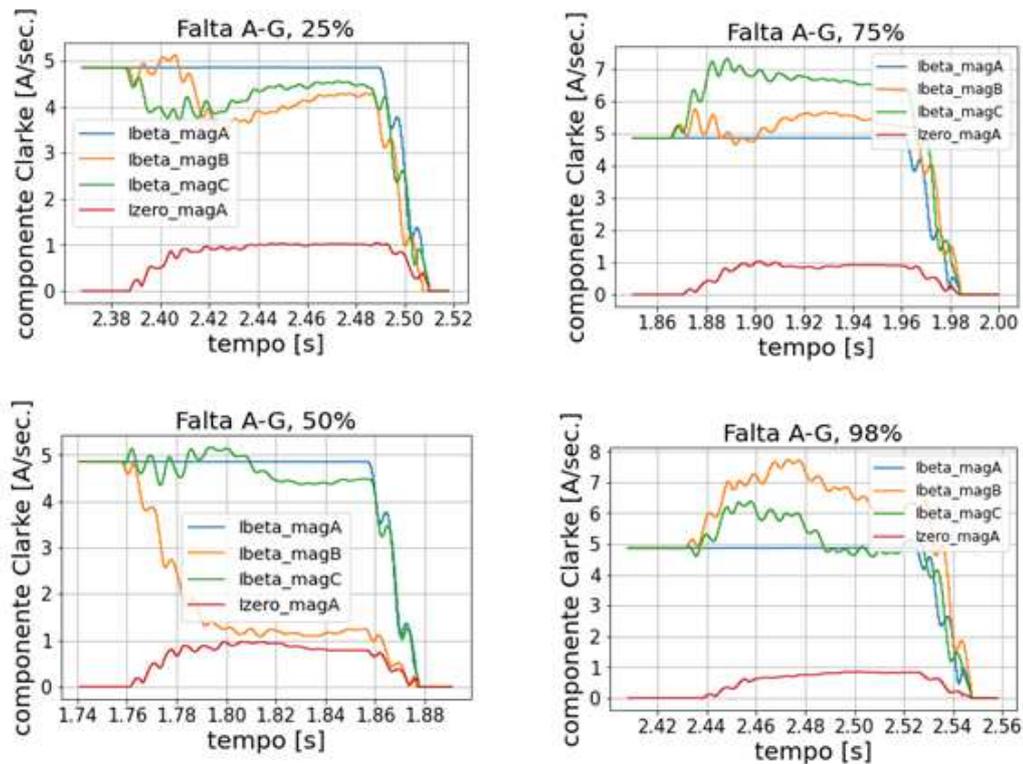


Figura 5.4 – Magnitude das componentes beta e zero dos fasores das correntes para falta A-G a 25, 50, 75, e 98% vista do extremo de envio - Medição no terminal de envio.

Na Figura 5.5 é apresentado o comportamento das magnitudes das componentes alfa dos fasores das correntes em amperes secundários para faltas monofásicas A-G a 25, 50, 75, e 98% da linha vista do terminal emissor, com resistência de falta de  $10 \Omega$ , 1,0 SIL de carga e ângulo de incidência de  $90^\circ$ . Pode-se observar que diferentemente da magnitude da componente beta do fasor da corrente da fase faltosa, a magnitude da componente alfa associada à fase faltosa varia ao longo do tempo, e é diferente da corrente de pré-falta (carga). Desta forma, não se pode identificar a falta monofásica utilizando a magnitude da componente alfa do fasor da corrente. Este comportamento se repete para faltas monofásicas ao longo de toda a linha TMO. Mais ainda, para faltas até 50% do comprimento da TMO a variação é inferior à corrente de carga, e para faltas acima de 50% a variação é superior à corrente de carga.

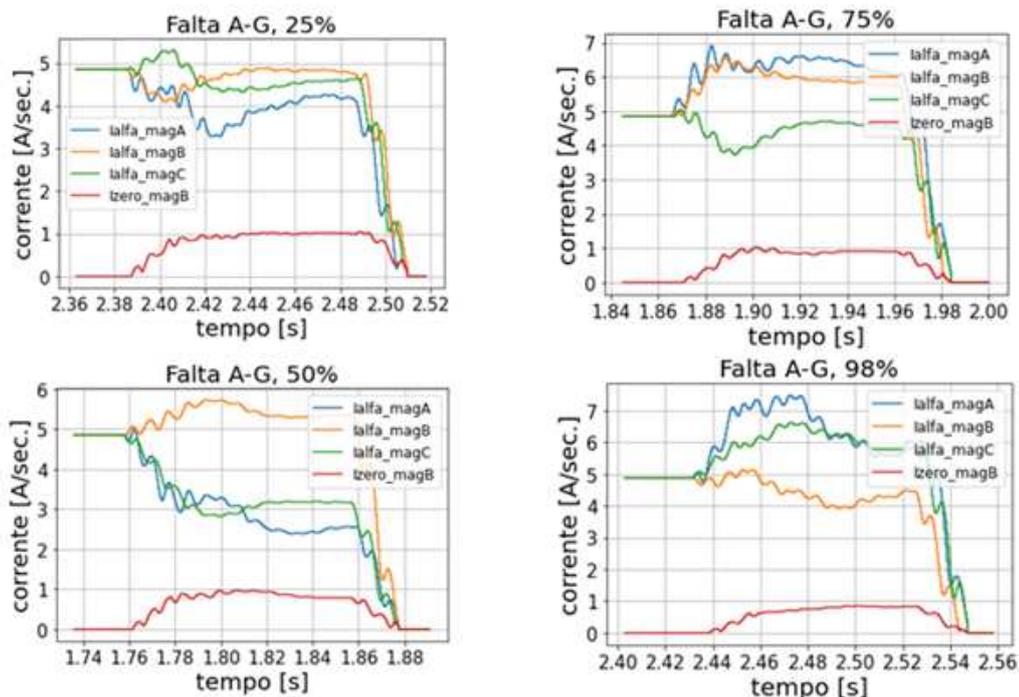


Figura 5.5 – Magnitude das componentes alfa e zero dos fasores das correntes para falta A-G a 25, 50, 75, e 98% vista do extremo de envio - Medição no terminal de envio.

Na Figura 5.6 apresentamos as derivadas das magnitudes das componentes beta e zero dos fasores das correntes para uma falta monofásica A-G a 25, 50, 75, e 98% vista do extremo emissor, tendo as mesmas condições de falta. Verifica-se que a derivada da magnitude

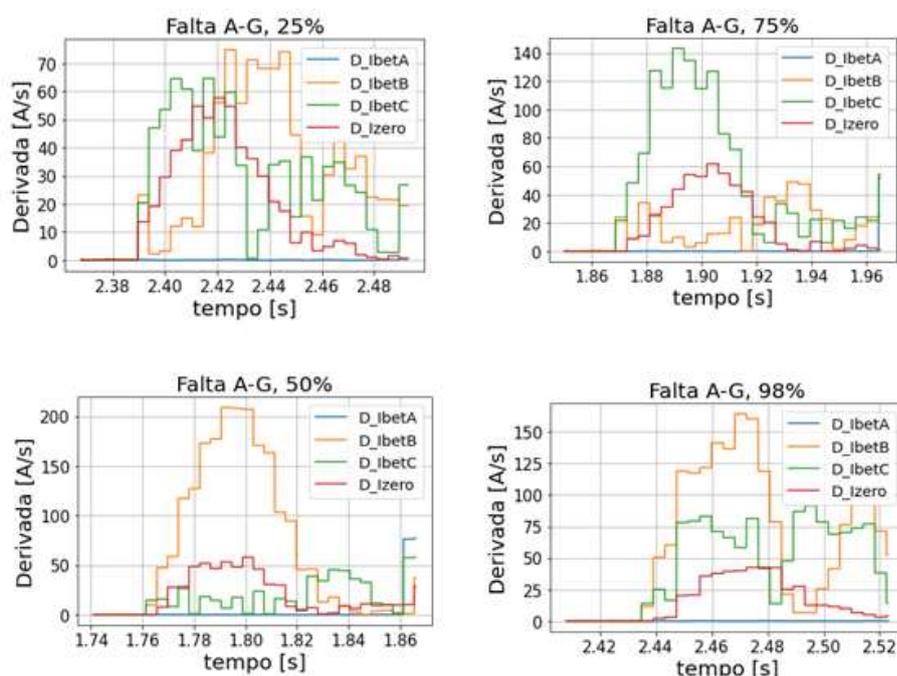


Figura 5.6 – Taxa de variação das magnitudes das componentes beta e zero dos fasores das correntes para falta AG a 25, 50, 75, e 98% vista do extremo de envio - Correntes medidas no terminal de envio.

da componente beta do fasor da corrente associada à fase faltosa é zero e a derivada da magnitude da componente zero é maior do que zero. Desta forma, o classificador de fases faltosas corretamente marcaria falta A-G na linha TMO.

Na Figura 5.7 apresentamos as derivadas das magnitudes das componentes alfa e zero dos fasores das correntes para uma falta monofásica A-G a 25, 50, 75, e 98% vista do extremo emissor, tendo as mesmas condições de falta. Verifica-se que a derivada associadas às componentes alfa não são nulas, impedindo o seu uso para classificar uma falta monofásica A-G.

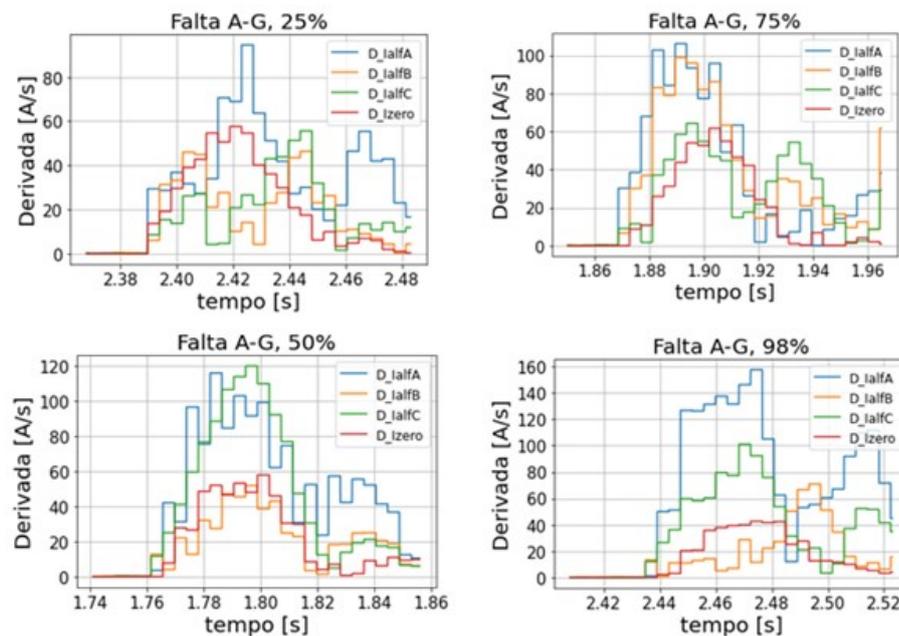


Figura 5.7 – Taxa de variação das magnitudes das componentes alfa e zero dos fasores das correntes para falta AG a 25, 50, 75, e 98% vista do extremo de envio - Correntes no terminal de envio.

Na Figura 5.8 apresentamos as magnitudes das componentes beta e zero dos fasores das correntes para uma falta monofásica A-G a 15, 35, 60, e 85% vista do extremo emissor, tendo as mesmas condições de falta. Verifica-se que a componente beta da fase faltosa é constante e a componente zero é diferente de zero, independentemente do ponto de ocorrência da falta. Do mesmo modo as figuras 5.9 e 5.10, apresentam o comportamento das magnitudes das componentes beta e zero de Clarke dos fasores das correntes para faltas B-G e C-G, respectivamente. Ou seja, a classificação de falta do algoritmo desenvolvido para faltas monofásicas opera corretamente.

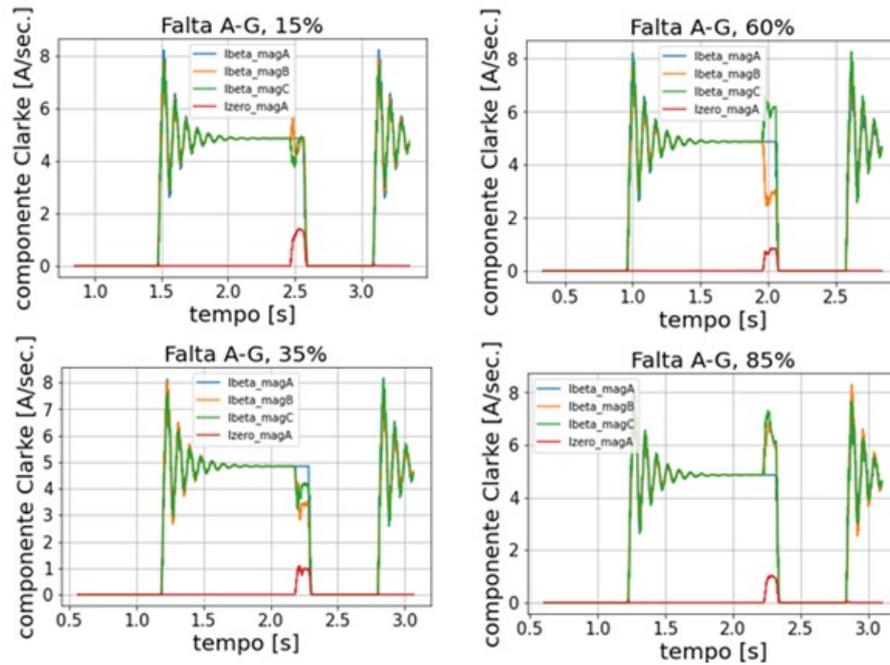


Figura 5.8 – Magnitude das componentes beta e zero das correntes para falta A-G a 15, 35, 60, e 85% vista do extremo de envio - Correntes no terminal de envio.

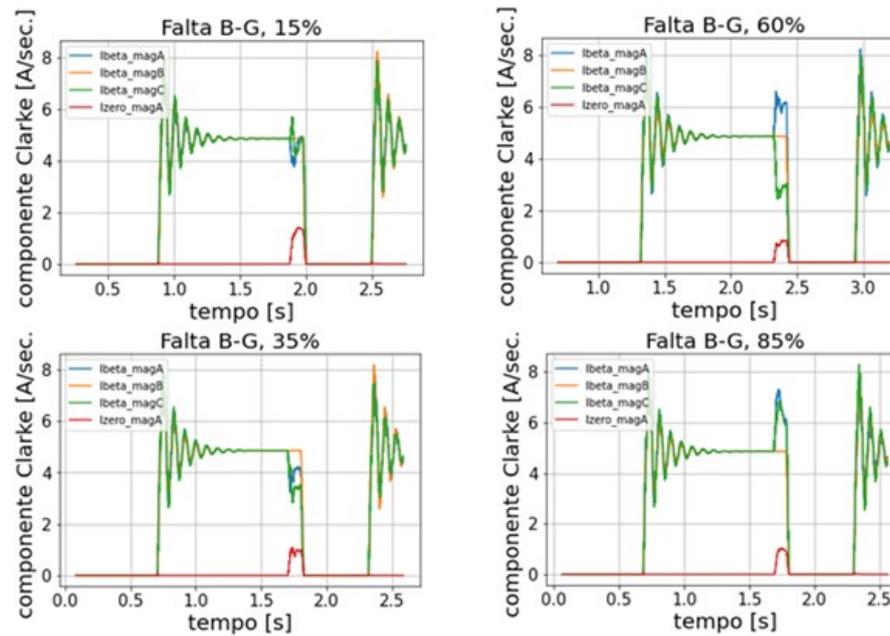


Figura 5.9 – Magnitude das componentes beta e zero das correntes para falta B-G a 15, 35, 60, e 85% vista do extremo de envio - Correntes no terminal de envio.

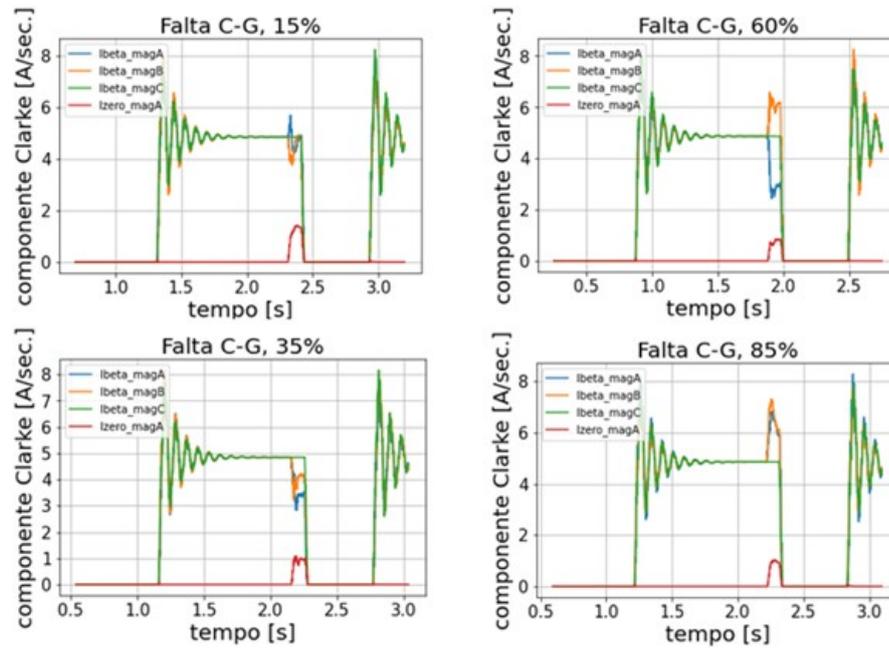


Figura 5.10 – Magnitude das componentes beta e zero das correntes para falta C-G a 15, 35, 60, e 85% vista do extremo de envio - Correntes no terminal de envio.

### 5.2.2 Faltas Bifásicas

Na Figura 5.11 apresentamos as magnitudes das componentes alfa das correntes, em ampéres secundários, para uma falta bifásica BC a 25, 50, 75, e 98% da TMO, com resistência

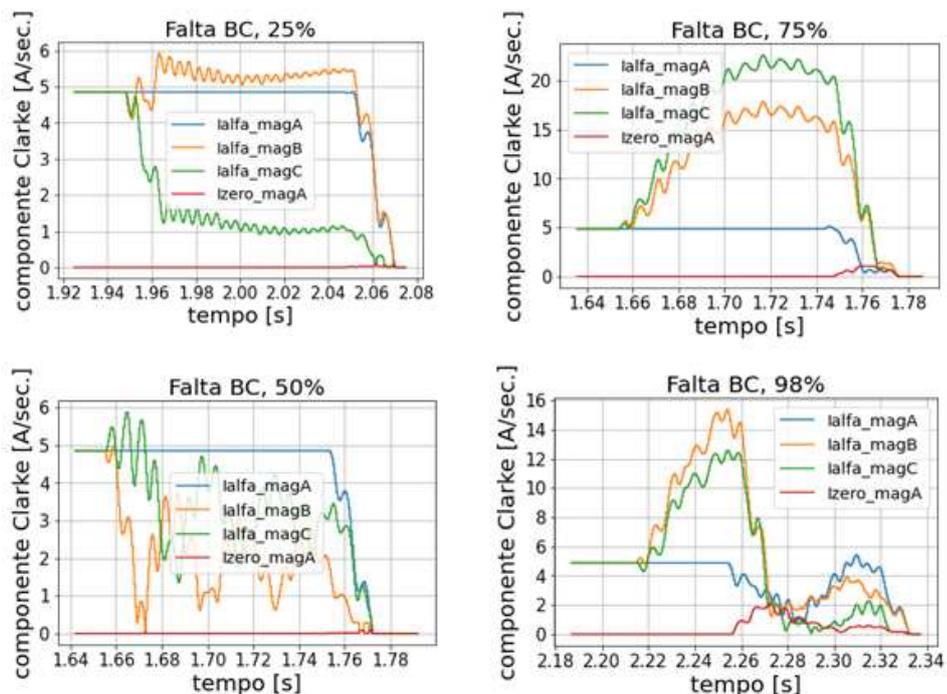


Figura 5.11 – Magnitudes das componentes alfa e zero dos fasores das correntes para falta BC a 25, 50, 75, e 98% vista do extremo de envio - Medição no terminal de envio.

de falta de  $10 \Omega$ , ângulo de inserção da falta de  $90^\circ$  e 1,0 SIL. Pode-se observar que para este tipo de falta a componente alfa da fase A, não envolvida no defeito, é constante e igual à corrente de pré-falta (corrente de carga), e a componente zero é igual a zero.

Na Figura 5.12 apresentamos as magnitudes das componentes beta das correntes, em ampères secundários, para uma falta bifásica BC a 25, 50, 75, e 98% da TMO, com resistência de falta de  $10 \Omega$ , ângulo de inserção da falta de  $90^\circ$  e 1,0 SIL. Pode-se observar que para este tipo de falta as componentes variam sendo diferentes da corrente de pré-falta (corrente de carga), e a magnitude da componente zero do fasor da corrente é nula, não sendo possível utilizar a componente beta para classificar este tipo de falta.

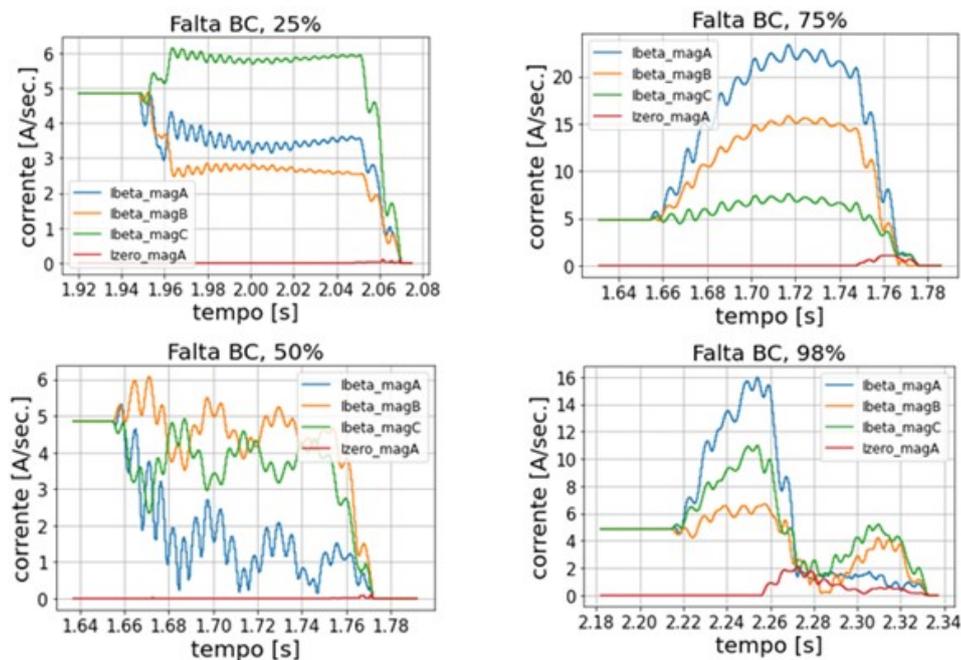


Figura 5.12 – Magnitudes das componentes beta e zero do fasor da corrente para falta BC a 25, 50, 75, e 98% vista do extremo de envio - Medição no terminal de envio.

Na Figura 5.13 temos as derivadas das magnitudes das componentes alfa e zero para faltas bifásica BC a 25, 50, 75, e 98% da TMO. Quando a falta ocorre no meio da linha, os algoritmos convencionais não conseguem identificar estas falhas. Pode-se observar que a derivada da magnitude da componente alfa associada à fase *sã*, neste caso a fase A, é nula e a derivada da magnitude da componente zero da corrente é também nula no momento da falta. O classificador de fases marcaria a falta como sendo uma falta BC, ficando dessa forma caracterizado o tipo de falta BC para faltas ao longo da linha da TMO.

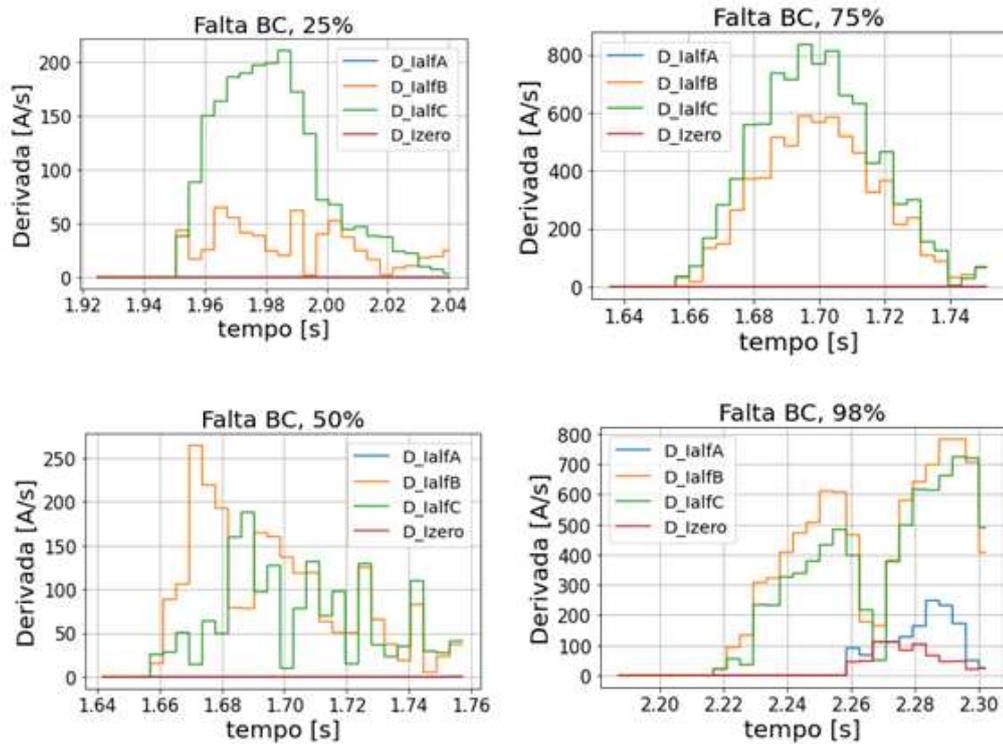


Figura 5.13 – Taxa de variação das magnitudes das componentes alfa e zero dos fasores das correntes para falta BC a 25, 50, 75, e 98% vista do extremo de envio - Correntes no terminal de envio.

Na Figura 5.14 temos as derivadas das componentes beta e zero para faltas bifásica BC a 25, 50, 75, e 98% da TMO. Podemos observar que as derivadas magnitudes das componentes beta, neste caso, são diferentes de zero no momento da falta. O período de tempo que o

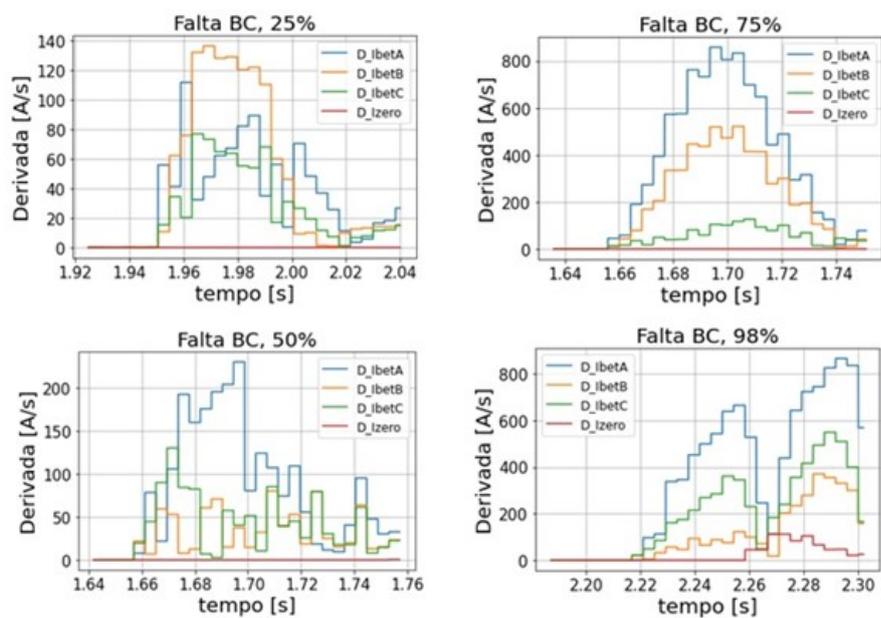


Figura 5.14 – Taxa de variação das componentes beta e zero das correntes para falta BC a 25, 50, 75, e 98% vista do extremo de envio - Correntes medidas no terminal de envio.

algoritmo tem para discriminar a falha é uma função da localização do ponto de ocorrência do defeito e dos ajustes do limiar do classificador, não sendo possível utilizar a componente beta para classificar este tipo de falha.

### 5.2.3 Falhas Bifásicas à Terra

Na Figura 5.15 apresentamos as magnitudes das componentes alfa dos fasores de corrente para uma falha bifásica à terra, BC-G, novamente em 25, 50, 75, e 98% do terminal emissor da TMO. É possível observar que as componentes alfa associadas à fase não faltosa, neste caso fase A, não é constante. Pode-se observar uma variação no sinal, que é maior no meio e nos pontos de ressonância da linha, o que significa que a derivada da magnitude da componente alfa para a caracterização da falha BC-G não é tão robusta nesses pontos. Porém, para grande parte do comprimento da linha ainda é viável o seu uso para a caracterização do tipo de falha. Isto acontece pelo envolvimento da terra, sendo este tipo de defeito o mais difícil de caracterizar com a metodologia proposta.

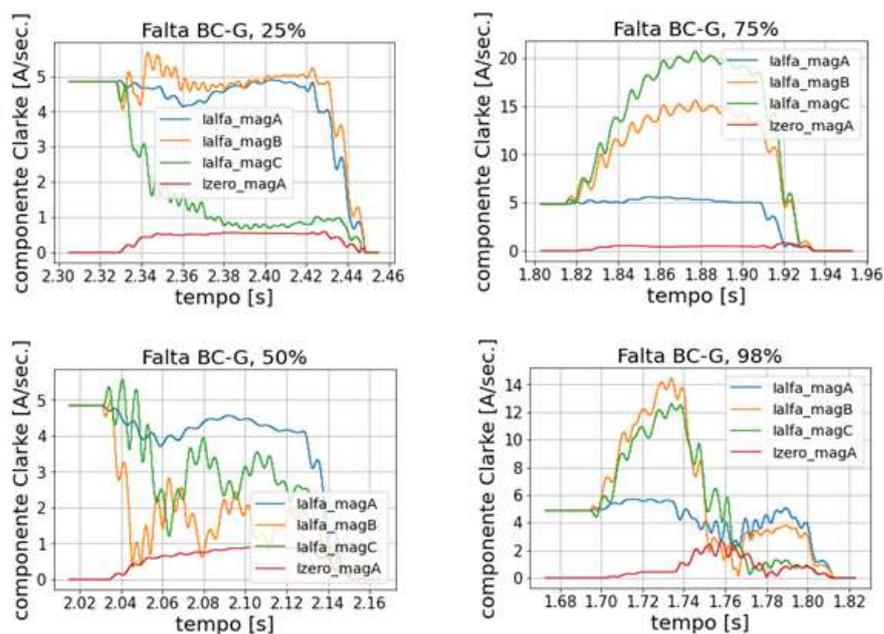


Figura 5.15 – Magnitudes das componentes alfa dos fasores das correntes, Falta BC-G a 25, 50, 75, e 98% do terminal emissor - Medição no extremo de envio.

Na Figura 5.16 apresentamos as magnitudes das componentes beta dos fasores das correntes para uma falha bifásica à terra, BC-G, novamente em 25, 50, 75, e 98% da TMO. É possível observar que as componentes beta variam no momento da falha, sendo seu comportamento diferente em cada ponto de falha apresentado.

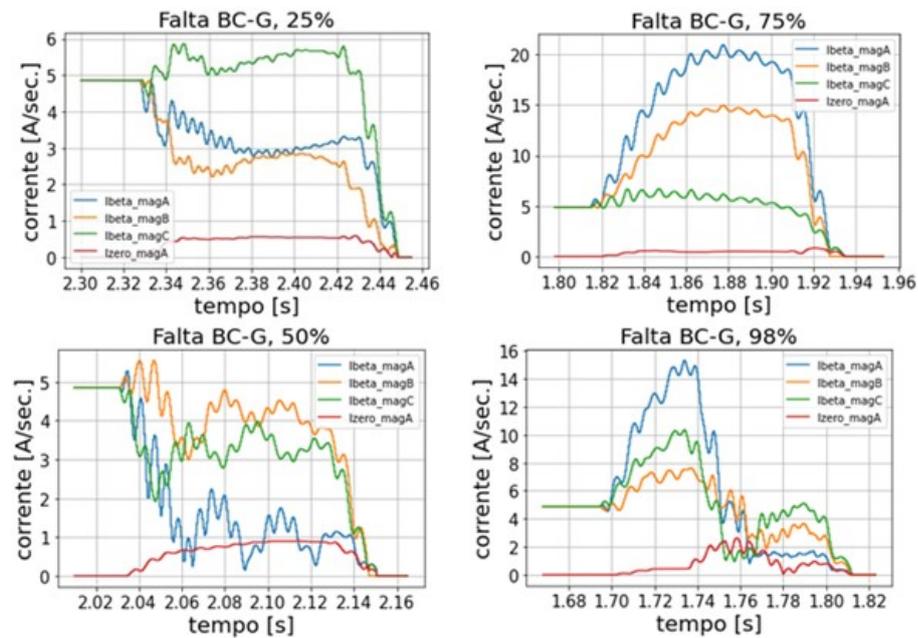


Figura 5.16 – Magnitudes das componentes alfa dos fasores das correntes, Falta BC-G a 25, 50, 75, e 98% do terminal de envio - Medição no extremo de envio.

Na Figura 5.17 apresentamos as derivadas das magnitudes das componentes alfa e zero dos fasores das correntes para uma falta bifásica à terra, BC-G, em 25, 50, 75, e 98% do terminal de envio da TMO. É possível observar que as derivadas das magnitudes das componentes alfa das correntes das fases sob falta são maiores do que a da fase A (não envolvida no defeito), e que a derivada da componente zero é maior do que zero. O classificador marcaria a falta como BC-G, ficando desta forma caracterizado o tipo de falta BC-G para faltas ao longo

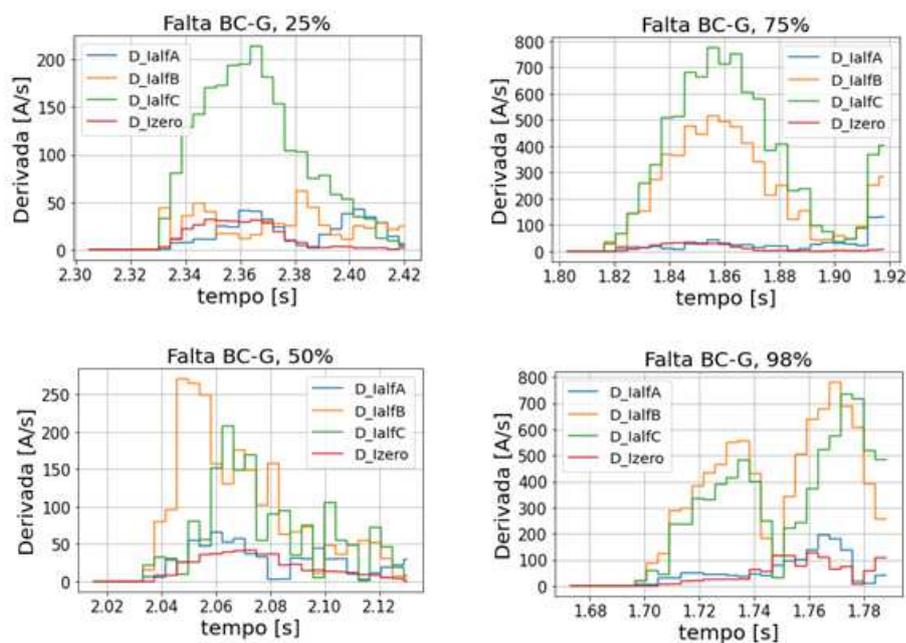


Figura 5.17 – Derivadas das magnitudes das componentes alfa, Falta BC-G a 25, 50, 75, e 98% do terminal de envio - Medição no extremo de envio.

da linha da TMO.

Na Figura 5.18 apresentamos as derivadas das magnitudes das componentes beta e zero para uma falta bifásica à terra, BC-G, em 25, 50, 75, e 98% do terminal de envio da TMO. É possível observar que as derivadas das magnitudes são maiores do que zero, tendo um comportamento diferente nos pontos de falta apresentados e que a derivada da magnitude da componente zero é maior do que zero.

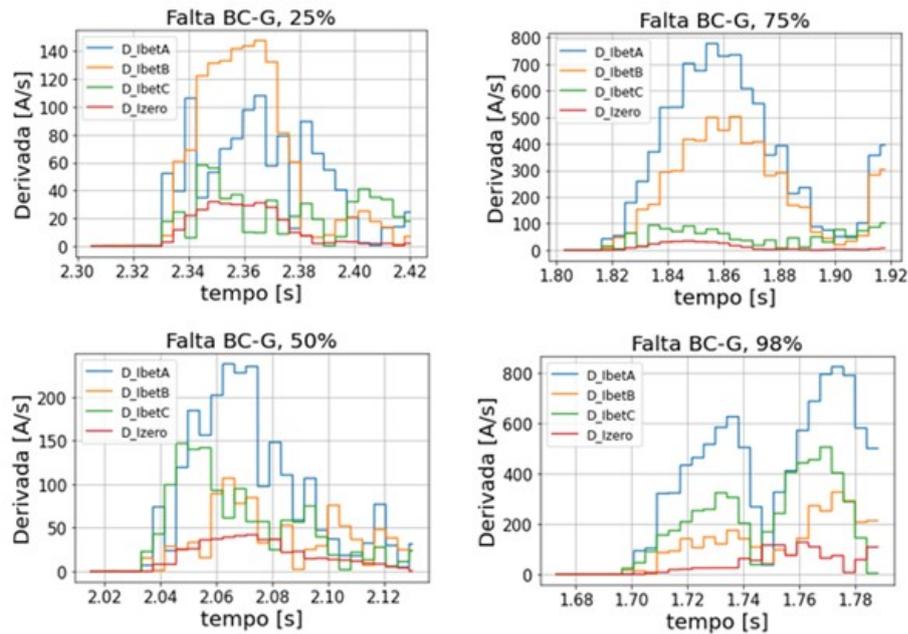


Figura 5.18 – Derivadas das magnitudes das componentes beta e zero dos fasores de corrente, Falta BC-G a 25, 50, 75, e 98% do terminal de envio - Medição no extremo de envio.

## 5.2.4 Faltas Trifásicas

Na Figura 5.19 apresentamos as magnitudes das componentes alfa e zero dos fasores de corrente para uma falta trifásica, ABC, em 25, 50, 75, e 98% do terminal de envio da TMO. As magnitudes das componentes alfa para as fases de referências A, B, e C têm o mesmo comportamento para todos os cenários apresentados.

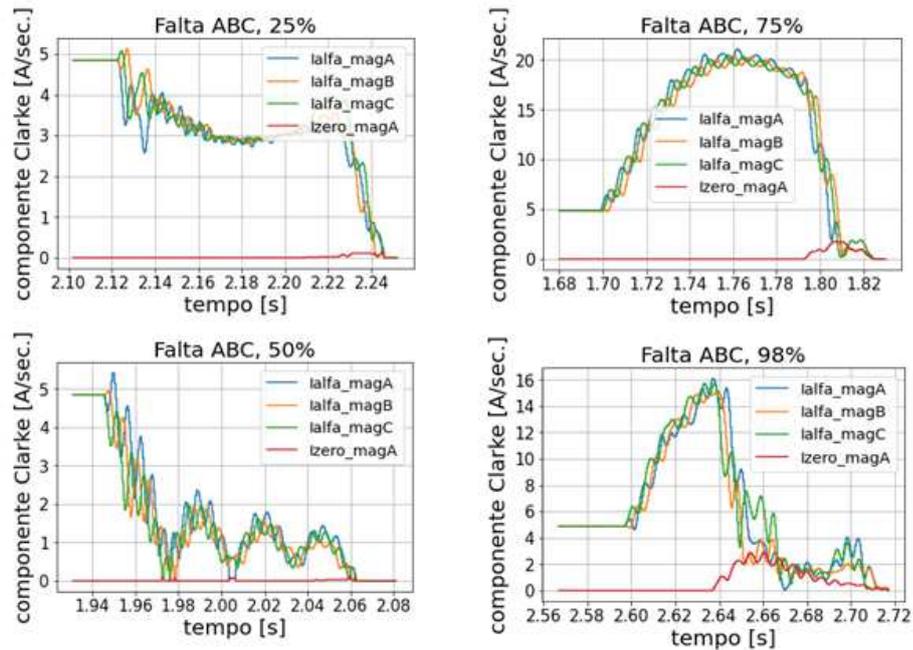


Figura 5.19 – Magnitudes das componentes alfa e zero dos fasores de corrente do terminal de envio para Falta ABC a 25, 50, 75, e 98% do terminal de envio - Medição no extremo de envio.

Na Figura 5.20 apresentamos as magnitudes das componentes beta e zero dos fasores das correntes para uma falta trifásica, ABC, em 25, 50, 75, e 98% do terminal de envio da TMO. As componentes beta têm o mesmo comportamento do observado das componentes alfa.

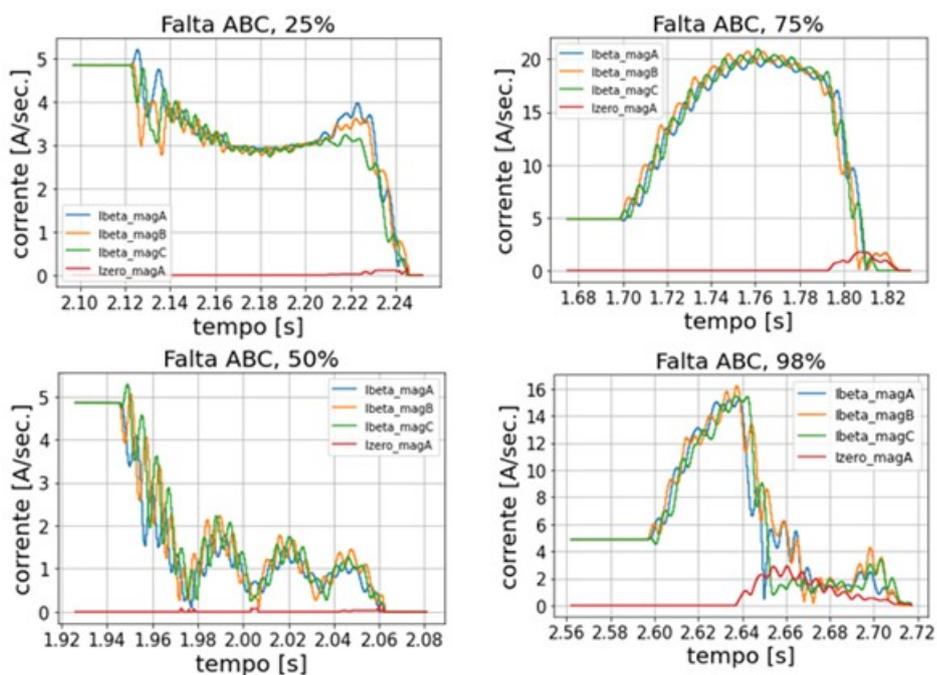


Figura 5.20 – Magnitudes das componentes beta e zero dos fasores de corrente do terminal de envio para Falta ABC a 25, 50, 75, e 98% do terminal de envio - Medição no extremo de envio.

Na Figura 5.21 apresentamos as derivadas das magnitudes das componentes alfa e zero dos fasores das correntes para falhas trifásicas ABC ao longo da TMO, incluindo 50%, um local muito difícil para outros algoritmos pela resposta de alta impedância. Na mesma figura observamos que as derivadas das magnitudes das componentes alfa são maiores do que a da componente zero (beta igual a da alfa) e a derivada da magnitude da componente zero é nula, ficando este tipo de falta bem caracterizado. Este comportamento é bem definido para falta ABC em qualquer local da linha, e de maneira similar para ambos extremos da TMO, emissor e receptor. Não há influência importante do nível de curto-circuito do terminal nem do sentido do fluxo de potência, pois os testes foram feitos para ambos os terminais.

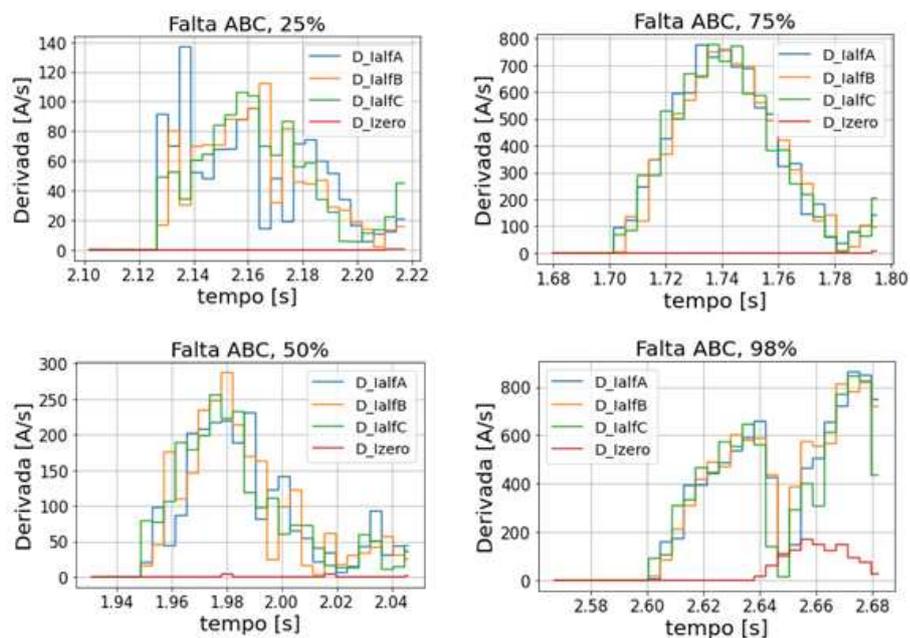


Figura 5.21 – Derivada das magnitudes das componentes alfa e zero dos fasores das correntes no terminal de envio para falta ABC a 25, 50, 75, e 98% do extremo de envio - Medição no envio.

Na Figura 5.22 apresentamos as derivadas das magnitudes das componentes beta e zero dos fasores das correntes para falhas trifásicas ABC ao longo da TMO, para faltas em 25, 50, 75 e 98% do terminal de envio. Observamos que as derivadas das magnitudes das componentes beta são maiores do que a da componente zero e iguais a da componente alfa.

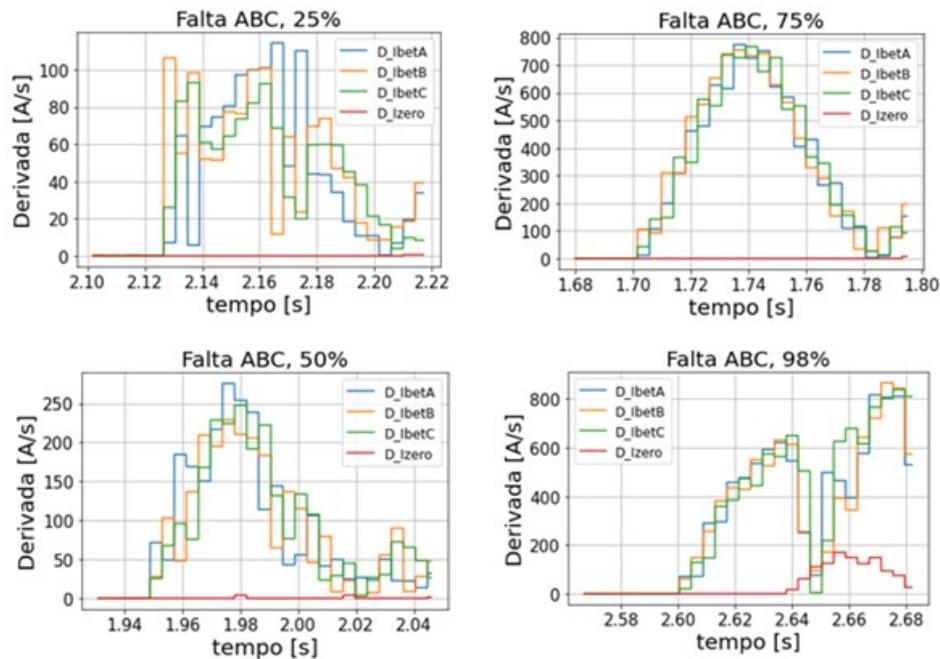


Figura 5.22 – Derivada das magnitudes das componentes beta e zero dos fasores das correntes no terminal de envio para falta ABC a 25, 50, 75, e 98% do extremo de envio - Medição no envio.

Na ocorrência de faltas bifásicas, bifásicas a terra e trifásica entre 65% e 98% do comprimento da TMO ocorre a atuação dos spark gaps devido à sobretensões sustentadas provocadas pelas faltas. Isto se pode observar pelo crescimento da magnitude da componente zero. A utilização dos spark gaps, não comprometeu a classificação do tipo de falta.

Durante as simulações das faltas no sistema teste, foi observado que o algoritmo de classificação da fase faltosa atuava para fenômenos transitórios gerados pela energização da linha e para a manobra de religamento tripolar. Em ambos os casos as respostas do algoritmo desenvolvido foram similares a um defeito trifásico, como mostrado na Figura 5.23. Pode-se observar as derivadas das magnitudes das componentes beta e zero, sendo que as das componentes alfa têm o mesmo comportamento. Surgem elevadas derivadas que sensibilizam o classificador. Foi necessário implementar um esquema de bloqueio por subtensão, ativada quando a tensão se mantivesse abaixo de 0,90 p.u. por 5 ciclos. Uma vez ativada, o tempo de reposição do esquema de bloqueio é igual a 30 ciclos (tempo estimado para o transitório na TMO se extinguir). O esquema bloqueia o seletor para faltas trifásicas e bifásicas, de maneira que depois de uma manobra de energização ou religamento tripolar da linha TMO, o seletor de faltas estaria indisponível por 30 ciclos.

### 5.3 Transitórios de Energização da TMO

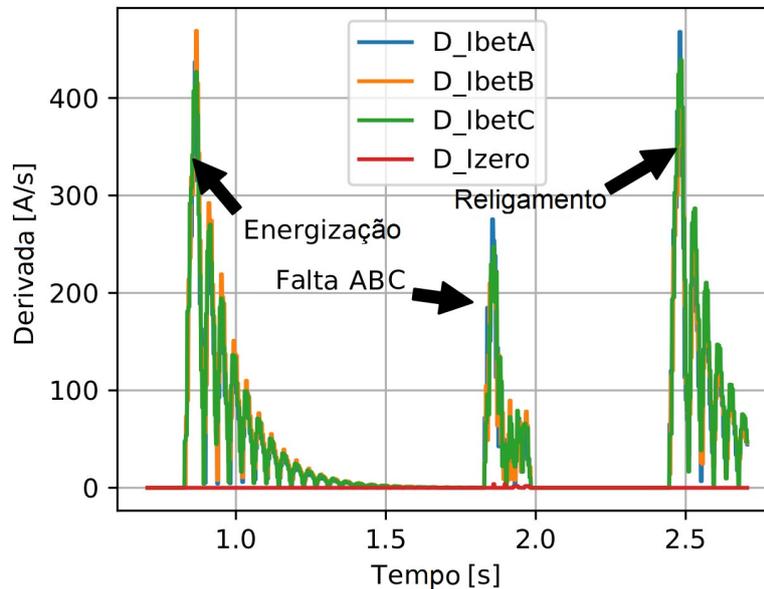


Figura 5.23 – Comportamento transitório das derivadas das magnitudes das componentes beta e zero da corrente da TMO para as manobras de energização e religamento monitoradas no terminal de envio.

### 5.4 Análise de Sensibilidade do Classificador

Foi efetuada uma extensa análise de sensibilidade com intuito de avaliar o desempenho do seletor de fases desenvolvido. Foram aplicados os diferentes tipos de faltas, variando o valor da resistência de falta (1, 10, 20 e 100  $\Omega$ ), e da potência transmitida no momento da falta (0 SIL, 0,5 SIL e 1,0 SIL), sendo o ângulo de inserção da falta usado para todos os casos foi de 90° (corresponde à pior condição). Em resumo, foram realizados 200 simulações para cada cenário, totalizando 2400 simulações.

Na Figura 5.24 pode-se observar a resposta do algoritmo para faltas monofásicas com diferentes resistências de falta e uma carga SIL. Conforme as falhas se movem para o final da linha, o tempo de resposta aumenta. Também é possível verificar que ocorrem discontinuidades nos tempos de disparo para faltas no meio da linha, que é uma zona de comportamento de alta impedância.

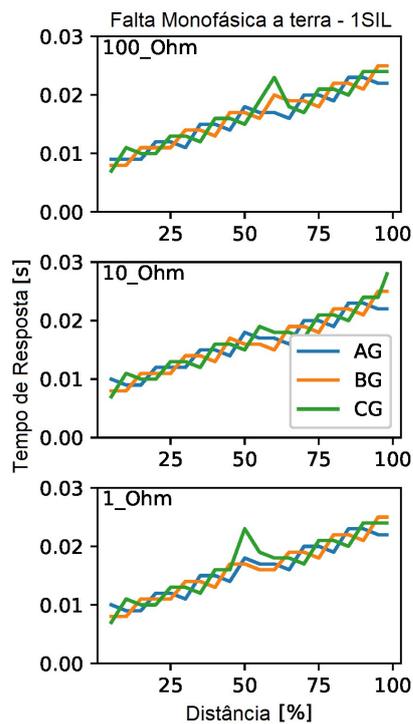


Figura 5.24 – Tempo de resposta do classificador localizado no terminal emissor para faltas monofásicas com carregamento de 1,0 SIL - Faltas ao longo da linha.

Como para faltas monofásicas, a resposta do algoritmo para faltas bifásicas e trifásicas é semelhante, havendo um maior tempo de resposta para faltas no final da linha, conforme indicado na Figura 5.25. Os maiores tempos de resposta são apresentados para faltas trifásicas nas zonas de ressonância da TMO. Tempos iguais a zero indicam falha na resposta do algoritmo.

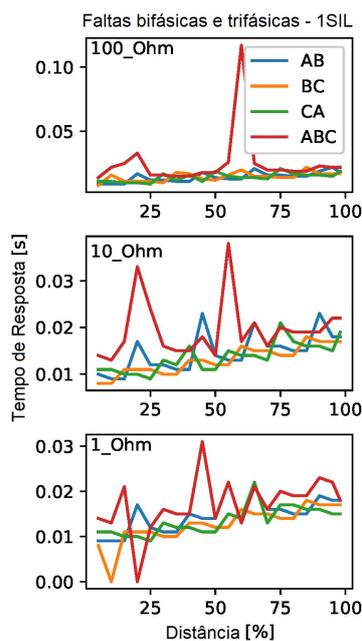


Figura 5.25 – Tempo de resposta do classificador localizado no terminal emissor para faltas bifásicas e trifásicas com carregamento de 1,0 SIL - Faltas ao longo da linha.

A Figura 5.26 mostra o tempo médio da resposta do algoritmo para defeitos trifásicos, bifásicos e monofásicos. Os tempos maiores ocorrem para faltas trifásicas nas zonas de ressonância do TMO. Os valores médios para falhas monofásicas e bifásicas são menores do que 25 ms, inclusive para faltas remotas e nas regiões de ressonância.

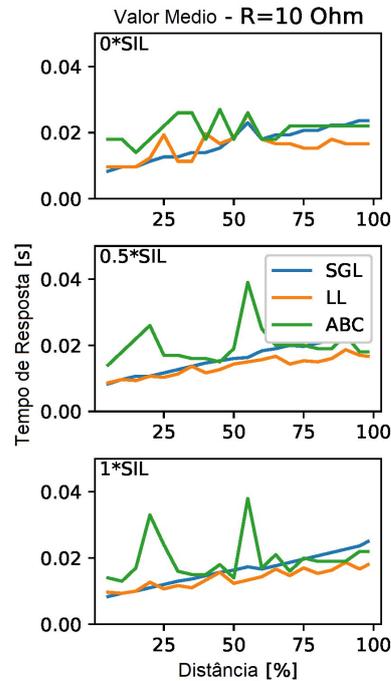


Figura 5.26 – Tempo médio da resposta do classificador localizado no terminal emissor para faltas AG, BC e ABC com carregamento de 1,0 SIL - Faltas ao longo da linha.

## 5.5 Análise do Desempenho do Algoritmo

Com o diagrama de caixa é possível observar diferentes valores estatísticos da resposta do algoritmo para diferentes condições de defeitos. Os tempos máximo e mínimo, assim como a zona interquartil, onde Q1 mostra os 25% dos valores inferiores, Q2 corresponde à mediana ou 50% dos valores, e Q3 mostra os 75% dos valores superiores. A mediana no centro da caixa nos mostra que a distribuição dos valores é simétrica para a maioria dos casos analisados.

### 5.5.1 Análise Estatística da Resposta do Classificador de Fases Faltosas

É possível observar que os maiores tempos de resposta do classificador de fase faltosa foram obtidos para condições em vazio da TMO, sendo o tempo máximo de 30 ms, conforme apresentado na Figura 5.27.

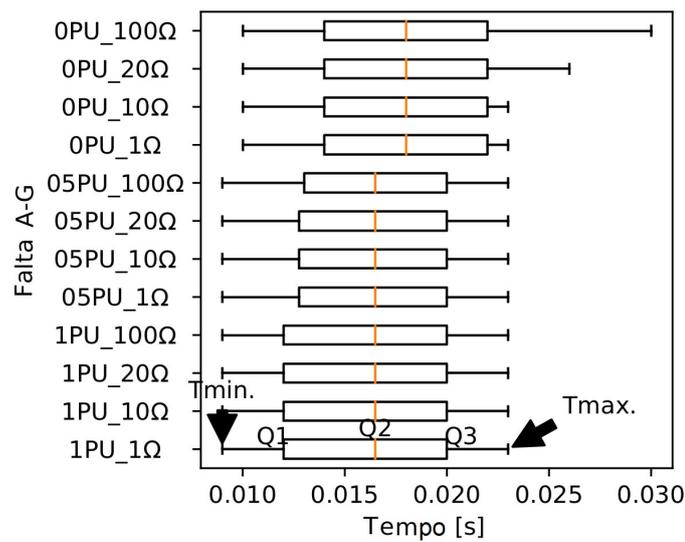


Figura 5.27 – Desempenho estatístico do algoritmo classificador para faltas A-G - Lado emissor monitorado.

A Figura 5.28 apresenta o comportamento do classificador de fases para faltas bifásicas BC ao longo da TMO. Podemos verificar que a sensibilidade do classificador de faltas diminui com a resistência da falta e com a variação do carregamento. Os valores dos tempos de resposta do seletor aumentam à medida que nos afastamos do terminal de envio.

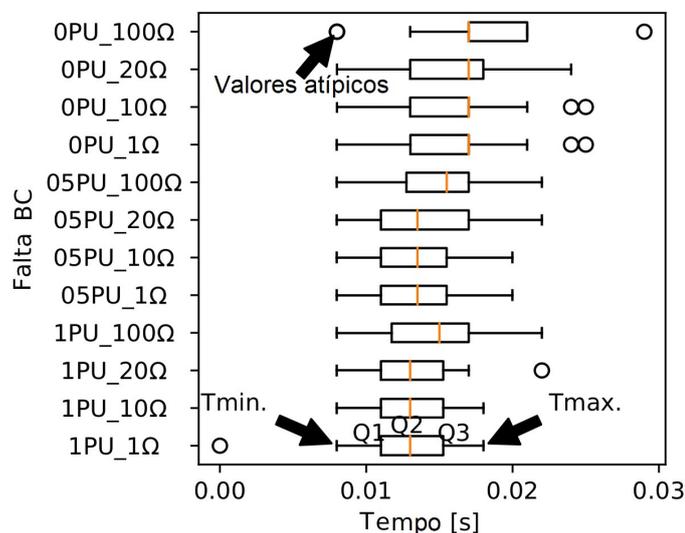


Figura 5.28 – Desempenho estatístico do algoritmo classificador de fases para faltas BC - Lado emissor monitorado.

A Tabela 5.1 apresenta os valores da média geométrica do tempo de resposta do classificador para diferentes tipos de falta ao longo da linha TMO, segundo as condições de falta de ângulo de inserção de 90°, resistência de falta de 10 Ω e carregamento de 1 SIL. Os maiores valores são apresentados pelas faltas bifásicas a terra, sendo superiores a 25 ms. A

medida do valor médio é afetada quando temos amostras atípicas, como por exemplos os tempos registrados nas zonas de ressonância da TMO ou tempos maiores para faltas ao final da linha.

Tabela 5.1 – Tempo médio de resposta do classificador.

Tipo Falta	Tempo [ms]
A-G	19,4
B-G	19,1
C-G	19,4
AB-G	30,0
BC-G	27,2
CA-G	29,2
AB	13,7
BC	12,7
CA	13,1
ABC	19,3

### 5.5.2 Análise da Precisão Relativa do Classificador de fases

A porcentagem do desempenho da resposta do classificador de fase com falta é baseada na relação da diferença da quantidade de testes realizados, menos a quantidade dos testes corretos, entre o total de teste realizado, dado pela equação 4.1.

A Figura 5.29 apresenta o desempenho da resposta do algoritmo proposto na identificação correta do tipo de falta. Pode-se observar que para os tipos de falta monofásica, bifásica

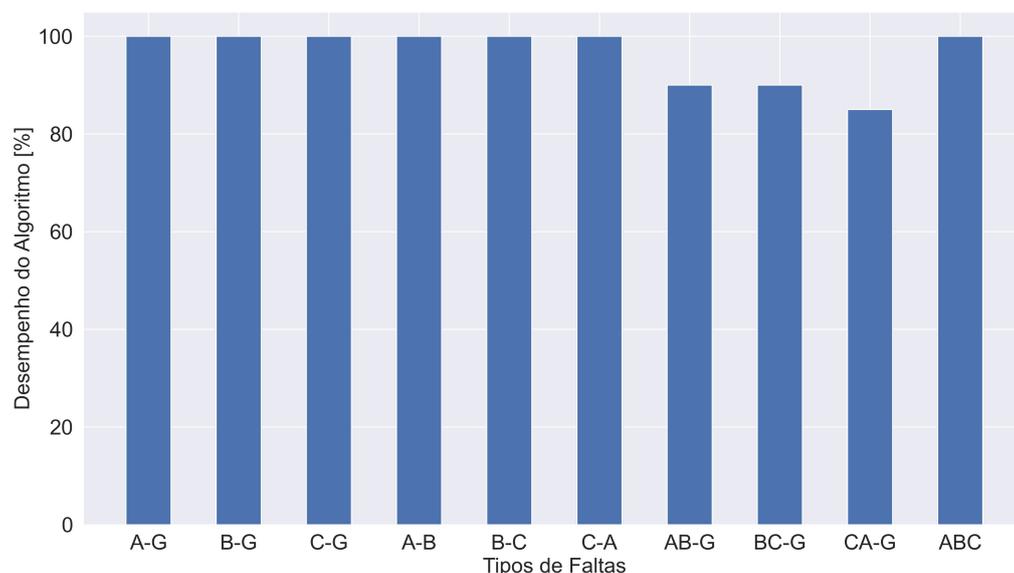


Figura 5.29 – Desempenho do algoritmo seletor de fases para diferentes tipos de faltas - Lado emissor monitorado.

e trifásica a resposta do algoritmo foi excelente. Para faltas bifásicas a terra a precisão do algoritmo encontra-se entre 80 e 90%, sendo o menor valor para a falta CA-G, o que também pode ser considerado satisfatório.

## 5.6 Desempenho do Classificador de Fases no Relé SEL-421

O algoritmo desenvolvido foi codificado no relé SEL-421, ver apêndice B, para que fosse realizado um teste em malha fechada com o simulador digital em tempo real RTDS, o chamado teste hardware-in-the-loop (HIL), com o uso do amplificador DOBLE. Posteriormente, foram realizados testes para avaliar o desempenho do algoritmo implementado no relé e comparar com o algoritmo codificado no próprio ambiente RTDS.

A Tabela 5.2 apresenta os sinais digitais próprios e implementados do relé SEL-421 sendo monitorados nos testes desenvolvidos. A variável PSV51 é a que monitora a perda dos sinais de tensão no relé, e ativa o sinal de bloqueio por baixa tensão (BLOQ\_27) implementado.

Tabela 5.2 – Sinais digitais do relé a serem monitorados.

ELEMENTO	DESCRIÇÃO
FLT_ABC	Falta Trifásica ABC
BLOQ_27	Bloqueio por Baixa Tensão
PSV51	Variável de Proteção do Relé
V1FIM	Tensão Instantânea Seq(+)
ER	Início da Oscilografia
PCT10Q	Elemento de Tempo
Z1P	Ativação da Zona 1
Z1PT	Atuação do Relé por Zona 1

Nos testes foi observado que o algoritmo implementado no relé apresentava comportamento similar ao do algoritmo no RTDS, inclusive durante as manobras de energização e do religamento da TMO, ou seja, era visto pelo algoritmo como uma falta trifásica (FLT\_ABC) (ver Figura 5.30).

A Figura 5.30 mostra a ativação do esquema de bloqueio por baixa tensão (BLOQ\_27) que é ativado pela variável de proteção PSV51, contudo nesta figura o esquema 27 ainda não atuava para bloquear o elemento FLT\_ABC. Também podemos observar a variação da magnitude da tensão instantânea de sequência positiva (V1FIM), e a oscilação dos sinais das tensões no momento da energização da linha TMO.

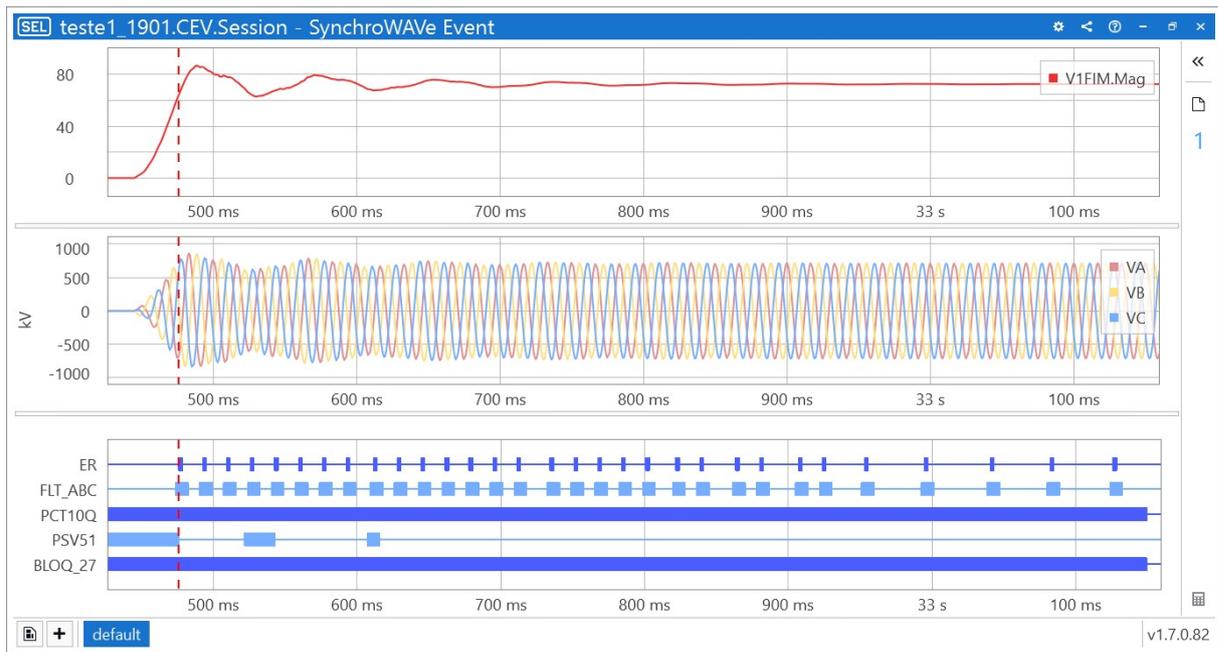


Figura 5.30 – Desempenho do algoritmo classificador de fases no SEL-421 visto do terminal de envio sem bloqueio implementado - Manobra de energização da TMO sem defeito.

Com o objetivo de solucionar esta resposta incorreta do algoritmo, se adotaram as seguintes medidas corretivas:

- Implementou-se um elemento de mitigação de sobretensões transitória, baseado em resistência de pré-inserção de  $250 \Omega$  e com tempo de inserção médio de 20 ms. Este esquema não foi suficiente para evitar que o seletor fosse ativado.
- Implementou-se um bloqueio de baixa tensão, usando a magnitude da tensão de sequência positiva (V1FIM). O esquema monitora o nível de tensão V1FIM e quando esta tensão ficar abaixo de 0,95 de V1FIM, o esquema espera 5 ciclos (este valor pode ser aumentado) e logo ativa a função de bloqueio do algoritmo, evitando que aconteça a ativação da função de falta trifásica (FLT\_ABC). O tempo de liberação do esquema de bloqueio é de 30 ciclos ou 500 ms, o que é suficiente para que o transitório tenha se extinguido, como pode ser observado na Figura 5.31.

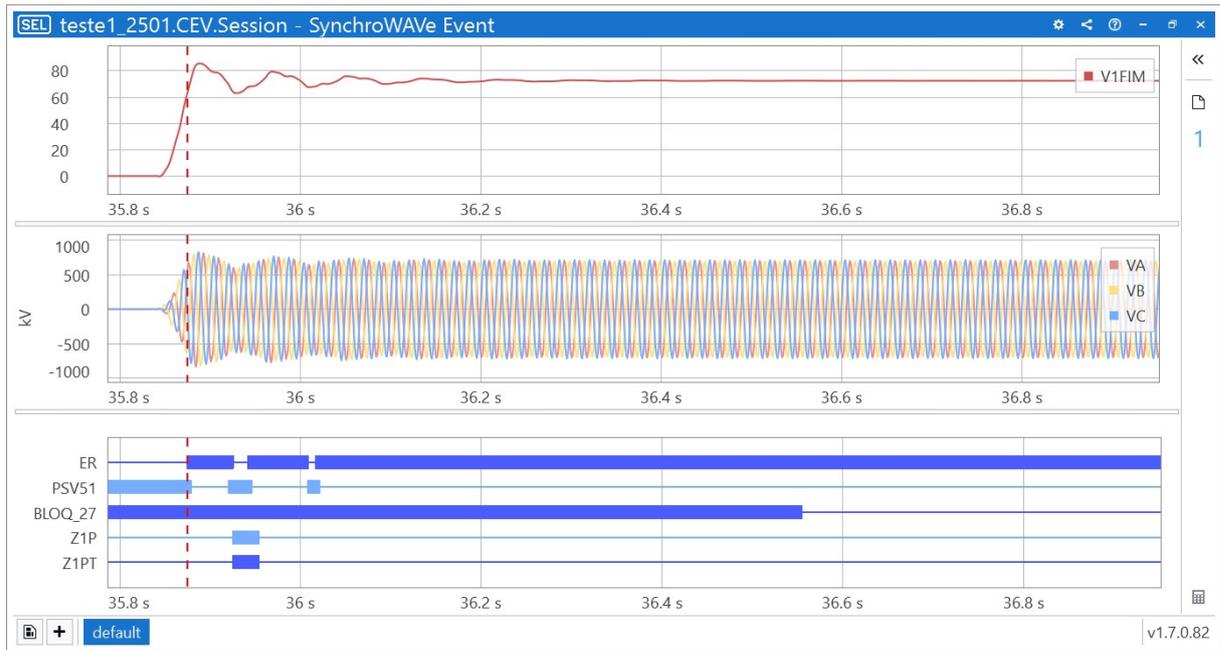


Figura 5.31 – Desempenho do algoritmo classificador de fases no SEL-421 visto do terminal de envio com bloqueio implementado - Manobra de energização da TMO sem defeito.

A Figura 5.32 mostra o efeito conjunto das medidas, para uma falta trifásica em 25% da TMO. Observa-se o tempo de retardo da liberação do bloqueio do algoritmo, permitindo ativação da binária do sinal de falta trifásica (FLT\_ABC) no início da falta, sendo o seu desempenho satisfatório. Depois do fim da falta observamos vários transitórios e o algoritmo bloqueia o sinal de FLT\_ABC, não bloqueando o sinal de falta Bifásica (FLT\_BC). Não está

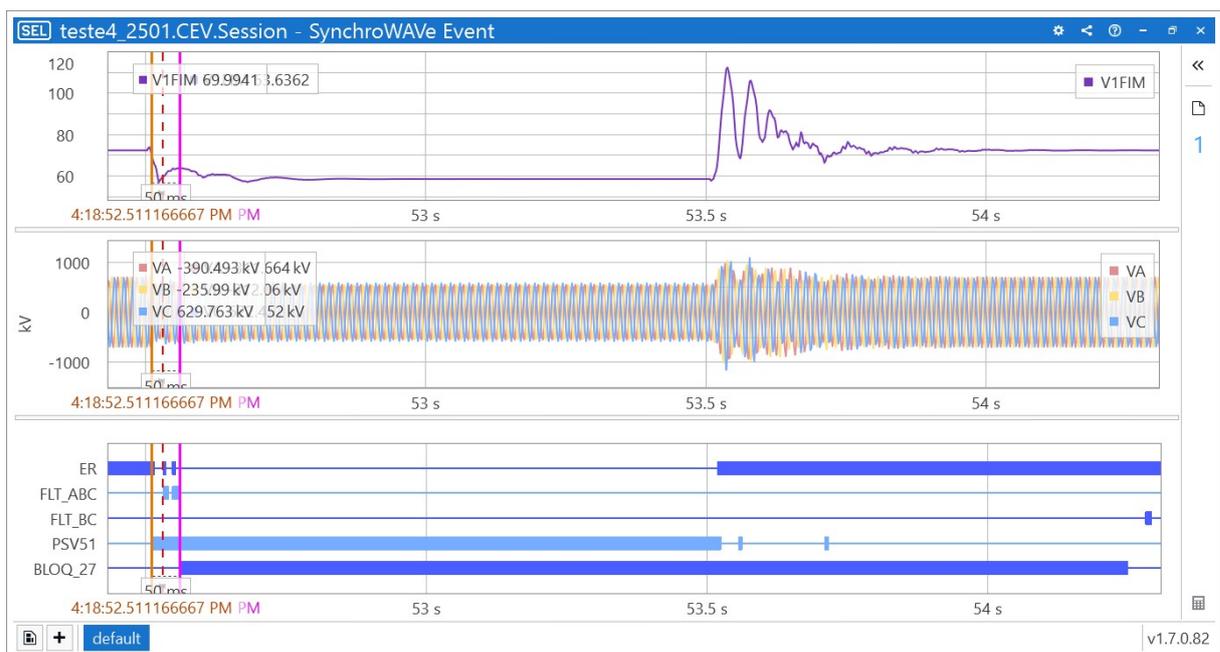


Figura 5.32 – Desempenho do Algoritmo classificador de Fases, Falta ABC no SEL-421, vista desde o terminal de envio.

claro qual a origem desse transitório.

## 5.7 Comparação dos Diferentes Métodos Existentes

A Tabela 5.3 apresenta um quadro comparativo das vantagens e desvantagens dos principais algoritmos desenvolvidos para classificação e seleção de falta para a linha TMO. Para o algoritmo apresentado por (SHI *et al.*, 2018), não foram apresentadas evidências do seu desempenho, e assumimos que a tecnologia wavelet apresenta alta precisão e velocidade, além de algumas outras vantagens. Os outros algoritmos da mesma forma, assim como o aqui proposto, apresentam algum tipo de problema, dependendo das condições do defeito.

O algoritmo apresentado por (ESPINOZA; TAVARES, 2018), trabalha no domínio fasorial, foi proposto para ser utilizado em relés de distância aplicados à linha TMO, sendo um método baseado na variação da diferença na impedância aparente pós e pré falta, precisando de ambos sinais de tensões e correntes para o cálculo da impedância. O método precisa de uma relação que discrimine se a terra está envolvida na falta, apresentando bom desempenho para resistência de faltas menores do que  $50 \Omega$ .

O algoritmo proposto nesta pesquisa apresenta característica e desempenho similares ao algoritmo apresentado por (ESPINOZA; TAVARES, 2018). As suas principais vantagens são:

- Pode trabalhar no domínio do tempo.
- Não precisa de informação de pré-falta.
- Funciona apenas com sinais de corrente, portanto pode ser utilizado em esquemas de proteção diferencial de corrente ou de sobrecorrente.
- Apresenta boa resposta para faltas com resistência superiores a  $50 \Omega$ .

Ambos algoritmos podem complementar-se, de forma a apresentar uma melhor solução para o classificador de fases com faltas em uma linha TMO.

Tabela 5.3 – Quadro comparativo dos diferentes algoritmos de seleção e classificação de fases para TMO.

MÉTODO	VANTAGENS	DESVANTAGENS
R. Espinosa e M. C. Tavares, Variação da impedância aparente das componentes de correntes e tensões de falta no domínio fasorial.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alta precisão.</li> <li>• Insensível à resistência de falta <math>&lt; 50 \Omega</math>.</li> <li>• Insensível à impedância do sistema.</li> <li>• Pode ser implementado em relés comerciais.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tempo de operação máximo maior do que 1 ciclo.</li> <li>• Precisa da informação das tensões e correntes de pré-falta.</li> <li>• Bom desempenho durante regime transitório.</li> </ul>
Yue Li, Zhenyu Xu e Tao Zheng, O método usa amostras da superposição das componentes de corrente e tensão de faltas no domínio do tempo.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alta precisão.</li> <li>• Insensível à resistência de falta</li> <li>• Insensível à impedância do sistema</li> <li>• Tempo de operação máximo de 15 ms</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Precisa da informação das tensões e correntes de pré-falta.</li> <li>• Sua sensibilidade pode ser influenciada pela impedância do sistema e a localização da falta.</li> </ul>
Xin Shi et all, Transformada wavelet no domínio do tempo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alta precisão e velocidade.</li> <li>• Insensível à resistência de falta</li> <li>• Insensível à impedância do sistema</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Precisa de equipamentos com DAC de 1 MHz.</li> <li>• Sensível ao ângulo de inserção da falta.</li> <li>• Precisa de canal de comunicação</li> </ul>
D. Jimenez, O. Dias e M.C. Tavares, Taxa de variação das magnitudes das componentes de Clarke no domínio fasorial	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alta precisão.</li> <li>• Insensível ao transitório de energização da linha.</li> <li>• Pode usar valores instantâneos.</li> <li>• Pode ser implementado em relés comerciais e algoritmos de análise pós-evento.</li> <li>• Não precisa de canal de comunicação.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tempo de operação máximo maior do que 1 ciclo.</li> <li>• Seu tempo de resposta pode ser afetada pela resistência de falta e localização da falta.</li> <li>• Menor sensibilidade para faltas bifásicas a terra em pontos de ressonância da TMO.</li> </ul>

# 6 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

## 6.1 Conclusão

Neste trabalho foram analisados diferentes aspectos relevantes aos objetivos propostos e os resultados foram explorados com o objetivo de criar as bases para estas conclusões. Nesse sentido, é conveniente resumir, de forma geral, os resultados obtidos. A pesquisa aqui desenvolvida permite as seguintes constatações.

### 6.1.1 Algoritmo Proposto para a Classificação de Falta na TMO

No presente trabalho apresenta-se um novo algoritmo para a classificação de fases sob falta em linhas de transmissão de meio comprimento de onda. O algoritmo foi validado em teste no RTDS com implementação em relés comerciais em um ambiente de teste em malha fechada. O algoritmo respondeu corretamente para todos os diferentes tipos de faltas em condições de carregamento máximo, e para resistência de falta de  $10 \Omega$ . Desta forma podemos concluir que:

- As faltas monofásicas são adequadamente caracterizadas pela taxa de variação das magnitudes das componentes beta e zero dos fasores das correntes da fase faltosa.
- As faltas bifásicas são caracterizadas pela taxa de variação das magnitudes das componentes alfa e zero dos fasores das correntes da fase sã, sendo ambas iguais a zero.
- As faltas bifásicas com terra são caracterizadas pela taxa de variação das magnitudes das componentes alfa, beta e zero dos fasores das correntes referente à fase não envolvida no defeito.
- Para as faltas trifásicas, a taxa de variação das magnitudes das componentes alfa e beta dos fasores das correntes são iguais e maiores do que zero. A componente zero é igual a zero.
- As faltas mais difíceis de determinar (baixa sensibilidade) para o seletor de fases são as faltas bifásicas à terra para defeitos nas regiões de ressonância (a 25% e 75% do comprimento).
- À medida que as faltas se aproximam do extremo receptor a sensibilidade do classificador de fase diminui, aumentando o tempo requerido para identificar o tipo de falta.

- A sensibilidade do classificador de fases não foi afetada pela resposta atípica da linha TMO em condições de carregamento nominal. O classificador de fases sob faltas apresentou comportamento semelhante nos dois terminais para os diferentes tipos de faltas, independente do sentido do fluxo de potência ou da força do sistema.
- O algoritmo apresentou sensibilidade devido aos transitórios gerados no momento da energização da linha TMO e/ou religamento tripolar depois da abertura do disjuntor da linha por ocorrência de uma falta. Em ambos casos a indicação do algoritmo foi o de uma falta trifásica ABC. Para eliminar a sensibilidade do algoritmo, foi inserido um bloqueio por subtensão com duração de meio segundo, aproximadamente. Neste período o algoritmo não detectaria faltas trifásicas.
- O desempenho do algoritmo foi superior a 99% para todas as faltas monofásicas, bifásicas e trifásicas, em todas as condições de teste. Para a falta bifásica a terra, o algoritmo apresentou um desempenho abaixo de 95%.
- Devido à presença da componente zero da corrente em condições de falta bifásica a terra, a magnitude da componente alfa do fasor de corrente da fase não envolvida na falta não é mais constante e sua derivada não é igual a zero. Quando somado à singularidade nos pontos de ressonância da linha TMO, o desempenho da resposta do algoritmo para este tipo de falta é comprometido.
- O algoritmo pode ser implementado em relés comerciais para classificação de fase faltosa em linha de transmissão.

### 6.1.2 Implementação do Algoritmo Proposto no Relé SEL- 421

Com o objetivo de avaliar o desempenho do algoritmo em um relé comercial, o mesmo foi implementado no relé SEL-421.

- O algoritmo proposto implementado no relé SEL-421 apresenta comportamento similar ao do algoritmo implementado no RTDS, incluindo durante as manobras de energização e do religamento da TMO. O seu desempenho foi satisfatório.
- Devido a limitações na quantidade de variáveis programáveis de proteções no relé SEL-421, só foi implementada a detecção de faltas monofásica A-G, bifásica A-B e trifásica ABC.

Como resultado da presente pesquisa, pode-se considerar que os objetivos primários relacionados com o desenvolvimento de um algoritmo robusto, confiável e seguro para classificação de fases faltosas para a linha de transmissão de muito longo comprimento, a TMO, foi foram alcançados.

## 6.2 Propostas para Continuação em Trabalhos Futuros

Como trabalhos futuros, identificamos os seguintes temas:

- Desenvolver uma função de proteção para a condição de fechamento sob falta (SOTF) da TMO, considerando que o algoritmo de classificação de falta para essa condição estaria bloqueado pela função ou esquema de baixa tensão.
- Desenvolver uma metodologia para a localização do defeito, com subsequente teste em ambiente em malha fechada com o uso de relés microprocessados iguais em ambos extremos da linha sendo sincronizados por um sistema GPS. Desta maneira será possível verificar a precisão do localizador.
- Produção de um conjunto de casos de referência com faltas para linha de TMO, que contenha diferentes cenários de falta do sistema sob estudo, de maneira a fazer uma análise mais completa do sistema. Este banco de teste poderá ser utilizado com ferramentas de inteligência artificial, do tipo de linguagem natural.
- Desenvolvimento de uma interface gráfica de usuário em ambiente windows, usando plataforma python, para análise pós-eventos com a implementação do classificador das fases faltosas proposto nesta pesquisa.

# Referências

- BAHRMAN, M. HVDC transmission overview. In: *2008 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition*. [S.l.: s.n.], 2008. p. 1–7. Citado na página 30.
- BONETTI, A.; YALLA, M. V.; HOLST, S. The IEC 60255-121: 2014 standard and its impact on performance specification, testing and evaluation of distance protection relays. In: *2016 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–6. Citado 3 vezes nas páginas 9, 32 e 33.
- CIGRE, W. B4. 46. *Voltage source converter (VSC) HVDC for power transmission—Economic aspects and comparison with other AC and DC technologies*. *CIGRE Brochure*, v. 492, 2012. Citado 5 vezes nas páginas 9, 18, 23, 29 e 30.
- CLARKE, E. *Circuit analysis of AC power systems; symmetrical and related components*. [S.l.]: Wiley, 1943. v. 1. Citado 6 vezes nas páginas 21, 38, 39, 50, 55 e 56.
- COOK, V. *Analysis of distance protection: Research studies press ltd*. 1985. Citado na página 59.
- DOMMEL, H. W. Digital computer solution of electromagnetic transients in single-and multiphase networks. *IEEE transactions on power apparatus and systems*, n. 4, p. 388–399, 1969. Citado na página 42.
- EPE. Plano decenal de expansão de energia 2030. *Brasília, DF, Brasil: Ministério das Minas e Energia (MME), Empresa de Pesquisa Energética (EPE)*, v. 2, 2020. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 17.
- ESPINOZA, R. G. F.; TAVARES, M. C. Faulted phase selection for half-wavelength power transmission lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 33, n. 2, p. 992–1001, 2018. Citado 3 vezes nas páginas 19, 37 e 82.
- FENG, T.; DONG, X.; WANG, B.; SHI, S.; LUO, S.; LEI, A.; TANG, L. Analysis of fault characteristics of half-wavelength ac transmission lines. In: *2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–5. Citado na página 19.
- FORTESCUE, C. L. Method of symmetrical co-ordinates applied to the solution of polyphase networks. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, v. 37, n. 2, p. 1027–1140, 1918. Citado na página 38.
- HUBERT, F. J.; GENT, M. R. Half-wavelength power transmission lines. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. 84, n. 10, p. 965–974, 1965. Citado na página 25.
- ILICETO, F.; CINIERI, E. Analysis of half-wavelength transmission lines with simulation of corona losses. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 3, n. 4, p. 2081–2091, 1988. Citado na página 26.
- KASZTENNY, B.; CAMPBELL, B.; MAZEREEUW, J. Phase selection for single-pole tripping—weak infeed conditions and cross country faults. In: *Proceedings of the 27th Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA*. [S.l.: s.n.], 2000. Citado na página 35.

- KASZTENNY, B.; GUZMÁN, A.; FISCHER, N.; MYNAM, M. V.; TAYLOR, D. Practical setting considerations for protective relays that use incremental quantities and traveling waves. In: *43rd Annual Western Protective Relay Conference, Washington, USA*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–25. Citado na página 37.
- KEZUNOVIC, M.; MELIOPOULOS, S.; VENKATASUBRAMANIAN, V.; VITTAL, V. *Application of time-synchronized measurements in power system transmission networks*. [S.l.]: Springer, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 32.
- KÜSEL, B. F.; MATEUS, A.; SILVA, K. M. Avaliação do desempenho da proteção de distância aplicada às linhas de transmissão com pouco mais de meio comprimento de onda. *IV Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétrico, Goiânia, GO*, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 36.
- LIU, Y.; TIAN, H.; LIU, Z.; QIN, X. Aspects of ultra-high voltage half-wavelength power transmission technology. *Global Energy Interconnection*, v. 1, n. 1, p. 96–102, 2018. Citado na página 37.
- LOPES, F. V.; KÜSEL, B.; SILVA, K. M. Traveling wave-based fault location on half-wavelength transmission lines. *IEEE Latin America Transactions*, v. 14, n. 1, p. 248–253, 2016. Citado na página 36.
- LOPES, F. V.; KÜSEL, B. F.; SILVA, K. M.; JR, D. F.; NEVES, W. L. Fault location on transmission lines little longer than half-wavelength. *Electric Power Systems Research*, v. 114, p. 101–109, 2014. Citado na página 36.
- MAGRIN, F. G. S. *Modelagem de um relé de proteção diferencial de transformador no RTDS*. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, 2018. Citado na página 50.
- MOREIRA, F. A. Transmissão de energia a longas distâncias com a tecnologia meia onda: Aspectos teóricos e estudos elétricos. *Transmissão de Energia Elétrica a Longas Distâncias com a Tecnologia Meia Onda—Aspectos Teóricos & Estudos Elétricos*, 2017. Citado 4 vezes nas páginas 16, 18, 23 e 24.
- ONS. *Plano da Operação Elétrica 2019/2020, PEL*. [S.l.], 2018. Citado na página 17.
- ONS. *Mapa do Sistema de Transmissão – Horizonte 2024*. 2019. <<http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/mapas>>. Citado na página 17.
- ORTEGA, J. A. S.; TAVARES, M. C. Critical fault analysis on half-wavelength transmission lines. In: *2018 Simposio Brasileiro de Sistemas Eletricos (SBSE)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–6. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 28.
- ORTEGA, J. S.; TAVARES, M. C. Transient analysis and mitigation of resonant faults on half-wavelength transmission lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 35, n. 2, p. 1028–1037, 2020. Citado 3 vezes nas páginas 40, 41 e 42.
- PADIYAR, K. *HVDC power transmission systems: technology and system interactions*. [S.l.]: New Age International, 1990. Citado na página 30.
- POMILIO, J. A.; PAREDES, H. K. M.; DECKMANN, S. M. Eletrônica de potência para geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. *São Paulo*, v. 23, p. 1–3, 2013. Citado na página 30.

- PORTELA, C.; SILVA, J.; ALVIM, M. Non-conventional AC solutions adequate for very long distance transmission - An alternative for the Amazon transmission system. *IEC/CIGRE UHV Symposium Beijing*, 2007. Citado na página 27.
- PRABHAKARA, F. S.; PARTHASARATHY, K.; RAO, H. N. R. Performance of tuned half-wave-length power transmission lines. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-88, n. 12, p. 1795–1802, 1969. Citado na página 26.
- SAHA, M. M.; IZYKOWSKI, J. J.; ROSOŁOWSKI, E. *Fault location on power networks*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 32 e 34.
- SAMORODOV, G.; KANDAKOV, S.; ZILBERMAN, S.; KRASILNIKOVA, T.; TAVARES, M. C.; JR, C. M.; LI, Q. Technical and economic comparison between direct current and half-wavelength transmission systems for very long distances. *IET Generation, Transmission & Distribution*, v. 11, n. 11, p. 2871–2878, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 31.
- SEL. Manual instruction sel-421 relay. 2001. Citado na página 44.
- SHI, X.; WANG, L.; GONG, Y.; ZHANG, X.; ZHU, Y. Phase selection and differential protection based on wavelet transform for half-wavelength ac transmission line. In: *IEEE. 2018 China International Conference on Electricity Distribution (CICED)*. [S.l.], 2018. p. 1180–1186. Citado 3 vezes nas páginas 19, 37 e 82.
- TAVARES, M. C.; PORTELA, C. M. Half-wave length line energization case test - proposition of a real test. In: *2008 International Conference on High Voltage Engineering and Application*. [S.l.: s.n.], 2008. p. 261–264. Citado na página 27.
- VIDIGAL, R. F. *Análise do comportamento de uma linha de um pouco mais de meio comprimento de onda sob diferentes condições de operação em regime permanente e durante a manobra de energização*. Dissertação — Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, 2010. Citado 3 vezes nas páginas 25, 26 e 27.
- WANG, G.; ZHAO, H.; HAO, Q. Research on fault location for uhv half-wavelength transmission lines. In: *2018 China International Conference on Electricity Distribution (CICED)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1341–1345. Citado na página 19.

# Anexos

# ANEXO A – Script Python

## A.1 Leitura Arquivos Comtrade

```

1
2
3 """Script Arquivos COMTRADE Estandar 1991_1999_2013"""
4 """Este script le arquivos em formato COMTRADE 1991 - 1999 - 2013 e
   grafica os sinais de tensoes e correntes."""
5 # Importando Modulos
6 import pandas as pd # Importando pandas
7 import numpy as np # Importando numpy
8 import matplotlib.pyplot as plt # Importando o modulo pyplot da
   Livreria Matplotlib
9 from datetime import datetime
10
11 def Multx_a(x):
12     """Esta funcao multiplica os valores das colunas das amostras dos
   canais analogos pelo o valor da variavel 'a' e soma a variavel
   'b' """
13     return x * value_V + value_W
14
15 """Parametros eletricos da Linha de Transmissao"""
16
17 # Obtendo os parametros eletricos da Linha de Transmissao (Longitude,
   R1,X1,B1,Z1,Y1, R0,X0,B0,Z0,Y0)
18 # Longitude da linha de Transmissao
19 #Longitude = float(input("Longitude da linha de Transmissao em km: ")
   )
20 #Tensao = int(input("Tensao Nominal da Linha em kV: "))
21
22 # Sequencia Positiva
23 R1 = float(input ("Valor Resistencia sequencia positiva em ohms/km.:
   "))
24 X1 = float(input ("Valor da Reatancia de sequencia positiva em ohms/km
   : "))
25 B1 = float(input ("Valor da Susceptancia de sequencia positiva em uS/
   km: "))

```

```
26
27 # Sequencia Zero
28 R0 = float(input("Valor Resistencia sequencia zero em ohms/km.: "))
29 X0 = float(input("Valor da Reatancia de sequencia zero em ohms/km: ")
30 )
31 B0 = float(input("Valor da Susceptancia de sequencia zero em uS/km: "
32 ))
33
34 # Parametros da Linha Sequencia Positiva
35 R1_Ohms = R1*Longitude
36 X1_Ohms = X1*Longitude
37 Z1 = R1_Ohms + X1_Ohms*1j # Impedancia de Sequencia Positiva em Ohms
38 Y1 = B1*Longitude*1E-06*1j # Admitancia de Sequencia Positiva
39
40 R0_Ohms = R0*Longitude
41 X0_Ohms = X0*Longitude
42 Z0 = R0_Ohms + X0_Ohms*1j # Impedancia de Sequencia Zero em Ohms
43 Y0 = B0*Longitude*1E-06*1j # Admitancia de Sequencia zero
44
45 # Calculo da Impedancia Caracteristica da Linha
46 Zc = np.sqrt(Z1/Y1)
47 Zc_real = abs(Zc)
48
49 # Calculo da Potencia Caracteristica da Linha
50 Pc = (Tensao*1e3)**2/Zc_real
51
52 # Calculo da Constante de propagacao
53 Const_Atenuacao = np.sqrt(Z1*Y1)
54
55 # Calculo do Factor de Compensacao de Sequencia Zero (K0)
56 K0 = (Z0 - Z1)/(3*Z1)
57
58 """Leitura do Arquivo *.CFG"""
59
60 # Elaborando lista com os nomes das colunas do arquivo *.CFG
61 list_cfg=['An', 'ch_id', 'ph', 'ccbm', 'uu', 'a', 'b', 'skew', 'min', '
62 max', 'primary', 'secondary', 'PS']
63
64 # Lendo o arquivo *.CFG
65 # Obtendo a rota e nome do arquivo COMTRADE
```

```
63 Arquivo_cfg = input('De-me a rota e o nome do Arquivo *.CFG, extremo
    emissor: ')
64
65 df_cfg=pd.read_csv(Arquivo_cfg, names=list_cfg) #Lendo arquivo *.cfg
66
67 """Obtendo os principais parametros do arquivo *.CFG"""
68
69 Total_Filas = int(len(df_cfg))
70
71 Numero_Channels = int(df_cfg.An[1])
72
73 Numero_Channels_Analogos = df_cfg.ch_id[1]
74
75 Numero_Channels_Analogos = int(Numero_Channels_Analogos[:-1])
76
77 Numero_Channels_Digitais = df_cfg.ph[1]
78
79 Numero_Channels_Digitais = int(Numero_Channels_Digitais[:-1])
80
81 Standard_IEEE = (df_cfg.ph[0])
82
83 Standard_IEEE
84
85 if Standard_IEEE == '1999':
86     Standard_IEEE= int(Standard_IEEE)
87
88 elif Standard_IEEE == '2013':
89     Standard_IEEE= int(Standard_IEEE)
90
91 else:
92     Standard_IEEE= 1991
93
94 Standard_IEEE
95
96 """Obtendo a data e hora do inicio do registro e do inicio da Falta do
    evento, segundo o Standard IEEE"""
97
98 if Standard_IEEE == 1991:
99     Data_Evento = df_cfg.An[Total_Filas-3]
100     Inicio_Registro = df_cfg.ch_id[Total_Filas-3]
```

```
101     Inicio_Falha = df_cfg.ch_id[Total_Filas-2]
102     MultxTempo = 1     # Multiplicador do tempo do evento
103     print (Data_Evento, Inicio_Registro, Inicio_Falha, MultxTiempo,
104           Standard_IEEE)
105
106 elif Standard_IEEE == 1999:
107     Data_Evento = df_cfg.An[Total_Filas-3]
108     Inicio_Registro = df_cfg.ch_id[Total_Filas-4]
109     Inicio_Falha = df_cfg.ch_id[Total_Filas-3]
110     MultxTempo = float (df_cfg.An[Total_Filas-1]) # Multiplicador do
111           tempo do evento
112     print (Data_Evento, Inicio_Registro, Inicio_Falha, MultxTiempo,
113           Standard_IEEE)
114
115 elif Standard_IEEE == 2013:
116     Data_Evento = df_cfg.An[Total_Filas-6]
117     Inicio_Registro = df_cfg.ch_id[Total_Filas-6]
118     Inicio_Falha = df_cfg.ch_id[Total_Filas-5]
119     MultxTempo = float (df_cfg.An[Total_Filas-3]) # Multiplicador do
120           tempo do evento
121     print (Data_Evento, Inicio_Registro, Inicio_Falha, MultxTiempo,
122           Standard_IEEE)
123
124 """Conversao da data do inicio do registro e da falta do evento a
125     formato datetime"""
126
127 # Juntando data e hora do inicio do registro
128 Data_Inicio_Registro = ' '.join([Data_Evento, Inicio_Registro])
129
130 # Juntando data e hora do inicio do Falta
131 Data_Inicio_Falha = ' ' .join([Data_Evento, Inicio_Falha])
132
133 #Convertendo a estampa de tempo
134 Data_Inicio_Registro = pd.to_datetime(Data_Inicio_Registro)
135
136 Data_Inicio_Falha = pd.to_datetime(Data_Inicio_Falha)
137
138 """Criando um DataFrame com os dados dos canais analogicos"""
139
140 # Crendo um subconjunto de Dados Analogos do DataFrame df_cfg
```

```
135 # contendo os valores das variaveis 'a' e 'b'
136 Dados_Analogo =df_cfg.iloc[2:2+Numero_Channels_Analogos,1:9]
137
138 # Criando um subconjunto de Dados Analogos do DataFrame df_cfg
139 # Extrair Valores das series 'a' e 'b'
140 value_ab= df_cfg.iloc[2:2 + Numero_Channels_Analogos, [1,5,6]]
141
142 # Criando uma Serie da coluna ch_id que identifica os canais analogos
143 # Esta serie usaremos para nomear as colunas do arquivo *.DAT
144 Serie_Ana = Dados_Analogo['ch_id']
145
146 #Criar nomes de colunas para o arquivo *.DAT
147 Serie_CH = df_cfg.loc[2:Numero_Channels +1, 'ch_id']
148
149 # Converter a serie_CH em uma lista
150 lista_CH = Serie_CH.tolist()
151
152 # criamos uma lista com dos string 'Muestras' y 'Stamp'
153 lista_nov=['muestras', 'time']
154
155 # Sumamos as listas: lista_nov com lista_CH
156 Name_Colum=lista_nov + lista_CH
157
158 # Ler o arquivo de dados *.DAT
159 long = len(Arquivo_cfg) # longitude da ruta e nome do arquivo *.cfg
160 exten = ('.dat') # extensao do arquivo *.dat
161 Arquivo_dat = Arquivo_cfg [:long- 3] # Ruta e nome do arquivo de
    dados sem a extensao dat
162 Arquivo_dat = Arquivo_dat + exten # Ruta e nome do arquivo *.dat
163
164 df_dat = pd.read_csv(Arquivo_dat, names=Name_Colum) # Leemos o
    arquivo de dados *.dat
165
166 # Subconjuntos de dados: Correntes e Tensoes do DataFrame df_dat
167 Subset_IV = df_dat.iloc[:, 1:Numero_Channels_Analogos+2]
168
169 # Filtramos a serie de tempo do DataFrame Subset_IV
170 Filtro_Subset_IV = Subset_IV.columns[1:]
171
172 # Subconjunto de Canais Analogicos, Correntes e Tensoes
```

```
173 Subset_Channels_Analogos = Subset_IV[Filtro_Subset_IV]
174
175 # Criamos a Serie da stamp do tempo dos dados
176 Tempo = df_dat['time']
177
178 # Multiplicamos o tempo pelo multiplicador do tempo, ultima linha do
    arquivo CFG, em micro segundo
179 Tempo = Tempo.mul(MultxTempo*1E-06)
180
181 # convertendo o string da informacao dos dados em estampa de tempo
182 Tempo_1 = pd.to_datetime(Tempo)
183
184 DIR = Data_Inicio_Registro
185 DIF = Data_Inicio_Falha
186
187 t1 = datetime.time(DIF)
188 t2 = datetime.time(DIR)
189
190 Inicio_Evento_Microsegundo = DIR.microsecond*1E-06
191 Inicio_Falta_Microsegundo = DIF.microsecond*1E-06
192
193 # Obtendo os valores reais das amostras da series analogas com (Xa +
    b)
194 value_a = value_ab["a"]
195 value_b = value_ab["b"]
196
197 # Re-seteamos a numeracao do index da variavel 'a' e 'b'
198 value_a = value_a.reset_index()
199 value_b = value_b.reset_index()
200
201 # Renomeamos valores das Serie 'a' e 'b'
202 value_V = value_a["a"]
203 value_W = value_b["b"]
204
205 #Convertidos os dados da variaveis 'value_V e value_W' em uma array
    de numpy
206 value_V = np.array(value_V)
207 value_W = np.array(value_W)
208
```

```
209 # Ao dataframe Channels_Analogos, aplicamos a funcao Multx_a, coluna
    por coluna
210 Channels_Analogos = Subset_Channels_Analogos.apply(Multx_a, axis=1)
211
212 Serie_Tempo_Real = Tempo +Inicio_Evento_Microsegundo
213
214 # Concatenamos a Serie Tempo Real com o DataFrame Channels_Analogos
215 Canales_Analogicos_1 = pd.concat([Serie_Tempo_Real, Channels_Analogos
    ], axis=1)
216
217 Canales_Analogicos_1.head()
218
219 Canales_Analogicos_1.tail()
220
221 # Graficamos Canais de Correntes
222 Canales_Analogicos_1.plot.line(x="time", y = ['IA', "IB","IC"], grid=
    True)
223
224 # Graficando Canais de Tensoes
225 Canales_Analogicos_1[["VA(kV)", "VB(kV)", "VC(kV)"]].plot(grid=True)
226
227 """Exportando os dados do DataFrame em formato de arquivo Excel"""
228
229 long = len(Arquivo_cfg) # longitude da ruta e nome do arquivo *.cfg
230 exten = ('xls') # extensao do arquivo *.xlsx
231 Arquivo_excel = Arquivo_cfg [:long- 3] # Ruta e nome do arquivo de
    dados sem a extensao dat
232 Arquivo_excel = Arquivo_excel + exten # Ruta e nome do arquivo *.xlsx
233
234 Canales_Analogicos_1.to_excel(Arquivo_excel, sheet_name = "
    Canais_Analogicos")
```

# ANEXO B – Script SEL-421

## B.1 Algoritmo Classificação de Falta

**# Logica do seletor de falta no relé SEL-421**

**# Ajustes do grupo 1 (Falta A-G, BC, e ABC)**

**# Etapa I: Calculo das componentes de Clarke**

**# Corrente: Componente Zero**

$PMV01 := (IAWFR + IBWFR + ICWFR) / 3.000000$

$PMV02 := (IAWFI + IBWFI + ICWFI) / 3.000000$

**# Corrente : Componente Alfa A**

$PMV03 := (IAWFR * 2.000000 - IBWFR - ICWFR) / 3.000000$

$PMV04 := (IAWFI * 2.000000 - IBWFI - ICWFI) / 3.000000$

**# Corrente: Componente Alfa B**

$PMV05 := (IBWFR * 2.000000 - IAWFR - ICWFR) / 3.000000$

$PMV06 := (IBWFI * 2.000000 - IAWFI - ICWFI) / 3.000000$

**# Corrente: Componente Alfa C**

$PMV07 := (ICWFR * 2.000000 - IAWFR - IBWFR) / 3.000000$

$PMV08 := (ICWFI * 2.000000 - IAWFI - IBWFI) / 3.000000$

**# Corrente: Componente Beta A**

$PMV09 := (IBWFR - ICWFR) * (0.577350)$

$PMV10 := (IBWFI - ICWFI) * (0.577350)$

**# Etapa II: Calculo das Derivadas**

**# Derivada da Corrente: Componente Zero**

$PMV21 := PMV20$

$PMV20 := PMV19$

$PMV19 := PMV18$

$PMV18 := PMV17$

$PMV17 := PMV16$

PMV16 := PMV15

PMV15 := PMV14

PMV14 := PMV13

PMV13 := SQRT(PMV01 \* PMV01 + PMV02 \* PMV02)

D\_IZERO := ABS((PMV13 - PMV21) / 0.016667)

**# Derivada da Corrente: Componente Alfa A**

PMV30 := PMV29

PMV29 := PMV28

PMV28 := PMV27

PMV27 := PMV26

PMV26 := PMV25

PMV25 := PMV24

PMV24 := PMV23

PMV23 := PMV22

PMV22 := SQRT(PMV03 \* PMV03 + PMV04 \* PMV04)

D\_IALFA := ABS((PMV22 - PMV30) / 0.016667)

**# Derivada da Corrente: Componente Alfa B**

PMV39 := PMV38

PMV38 := PMV37

PMV37 := PMV36

PMV36 := PMV35

PMV35 := PMV34

PMV34 := PMV33

PMV33 := PMV32

PMV32 := PMV31

PMV31 := SQRT(PMV05 \* PMV05 + PMV06 \* PMV06)

D\_IALFB := ABS((PMV31 - PMV39) / 0.016667)

**# Derivada da Corrente: Componente Alfa C**

PMV48 := PMV47

```
PMV47 := PMV46
PMV46 := PMV45
PMV45 := PMV44
PMV44 := PMV43
PMV43 := PMV42
PMV42 := PMV41
PMV41 := PMV40
PMV40 := SQRT(PMV07 * PMV07 + PMV08 * PMV08)
D_IALFC := ABS((PMV40 - PMV48) / 0.016667)
# Derivada da Corrente: Componente Beta A
PMV57 := PMV56
PMV56 := PMV55
PMV55 := PMV54
PMV54 := PMV53
PMV53 := PMV52
PMV52 := PMV51
PMV51 := PMV50
PMV50 := PMV49
PMV49 := SQRT(PMV09 * PMV09 + PMV10 * PMV10)
D_IBETA := ABS((PMV49 - PMV57) / 0.016667)
# Ajuste Derivada Alta
PMV58 := 1.000000
# Ajuste Derivada Baixa
PMV59 := 0.500000
# Derivadas Correntes Altas
PSV07 := D_IZERO > PMV58
PSV08 := D_IALFA > PMV58
PSV09 := D_IALFB > PMV58
PSV10 := D_IALFC > PMV58
```

PSV11 := D\_IBETA > PMV58

**# Derivadas Correntes Baixas**

PSV15 := D\_IZERO <= PMV59

PSV16 := D\_IALFA <= PMV59

PSV17 := D\_IALFB <= PMV59

PSV18 := D\_IALFC <= PMV59

PSV19 := D\_IBETA <= PMV59

**# Seletor de Falta (Sem Falta, Falta ABC e Logica de Bloqueio)**

**# Logica Sistema sem Falta**

PSV01 := PSV15 AND PSV16 AND PSV17 AND PSV18 AND PSV19 AND (NOT PSV50)

**# Logica de Bloqueio**

PSV02 := FLT\_ABC OR FLT\_AG OR FLT\_BC AND (NOT PSV50)

PLT11S := R\_TRIG PSV02

PLT11R := 0

PSV24 := PLT11

**# Energização da Linha**

PSV50 := (D\_IALFA > 40.000000) AND (D\_IALFB > 40.000000) AND (D\_IALFC > 40.000000) AND (D\_IBETA > 40.000000) AND PSV15

PSV03 := PSV08 AND PSV09 AND PSV10 AND PSV11 AND PSV15 AND (NOT PSV02) AND (NOT PSV50)

**# Logica Falta ABC**

AND (NOT BLOQ\_27)

PCT01PU := 0.300000

PCT01DO := 0.300000

PCT01IN := PSV03

**# saída Falta ABC (3F\_FAULT)**

FLT\_ABC := PCT01Q