

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA**

Silvio Giuseppe Di Santo

**Localização de faltas em linhas de transmissão com
compensação série utilizando técnicas heurísticas**

São Paulo

2022

Silvio Giuseppe Di Santo

**Localização de faltas em linhas de transmissão com
compensação série utilizando técnicas heurísticas**

Tese apresentada ao Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Livre Docente.

Área de concentração: Sistemas de Potência

São Paulo

2022

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catálogo-na-publicação

Di Santo, Silvio Giuseppe

Localização de faltas em linhas de transmissão com compensação série utilizando técnicas heurísticas / S. G. Di Santo -- São Paulo, 2022.

131 p.

Tese (Livre-Docência) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas.

1.SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA 2.LINHAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA 3.PROTEÇÃO DE EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas II.t.

Este trabalho é dedicado à minha esposa Katia Gregio Di Santo, ao meu filho Gabriel Gregio Di Santo e ao meu filho canino Kadu, pela força, companheirismo e paciência pelas horas que não passamos juntos para que esta tese fosse concluída.

Agradecimentos

Em primeiro lugar agradeço à Deus, pois sem Ele não teria forças para a batalha do dia-a-dia.

Agradeço à minha esposa Katia, ao meu filho Gabriel e ao meu cachorrinho Kadu, pela força, alegria e acolhimento nos momentos difíceis.

Agradeço aos meus pais pela sabedoria, educação e pelas sábias e confortantes palavras nos momentos de decisão.

Agradeço aos amigos e colegas de profissão, professores Giovanni, Milana, Pellini que estão sempre ao meu lado na luta diária da arte de educar e produzir ciência de qualidade.

Por último, mas não menos importante, agradeço aos meus orientados da pós-graduação, em especial aos alunos Álvaro e Rodrigo (apesar de não ser meu orientado) que me ajudaram na edição do artigo fruto desta tese.

“Uma das regras básicas do universo é que nada é perfeito. Perfeição simplesmente não existe... Sem imperfeição, nem eu nem você existiríamos.”

Stephen Hawking

Resumo

DI SANTO, S.G. **Localização de faltas em linhas de transmissão com compensação série utilizando técnicas heurísticas**. 2022. 131p. Tese (Livre Docência) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022.

Nesta tese de Livre Docência foi desenvolvido um algoritmo de localização de faltas em linhas de transmissão de energia elétrica aplicável a linhas com compensação série. O método proposto é baseado em otimização, localizando a falta ao minimizar os erros entre medições e cálculos dos fasores de tensão e corrente pós-falta. A vantagem deste algoritmo em relação às abordagens existentes na literatura contemporânea é a habilidade de localizar qualquer falta independentemente do projeto e posicionamento da compensação série na linha de transmissão. A validação do método proposto foi realizada com a aplicação de diversas faltas numa linha de transmissão de 500 [kV] com circuito duplo e compensação série simulada no Alternative Transient Program (EMTP-ATP). Os resultados obtidos indicam que tal método forneceu estimativas precisas de localização de faltas na linha de transmissão, com erros menores de 1%, utilizando tanto dados pós-falta em regime permanente como transitório. Além disso, o algoritmo proposto é robusto mesmo em situações de faltas com resistência alta e erros nos parâmetros da linha e na extração de fasores, apresentando-se como uma alternativa precisa e confiável para localizar faltas em linhas de transmissão com compensação série. Como fruto desta tese, o artigo intitulado “Optimization-Based Fault Location Algorithm for Series-Compensated Power Transmission Lines” foi publicado na conceituada revista IEEE Access.

Palavras-chave: Localização de faltas. Otimização. Linhas com compensação série.

Abstract

DI SANTO, S.G. **Fault location on series compensated transmission lines using heuristic techniques**. 2022. 131p. Thesis (Livre Docência) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022.

In this Livre Docência thesis, a fault location algorithm was developed for electric power transmission lines applicable to lines with series compensation. The proposed method relies on an optimization algorithm, locating faults by minimizing errors between measured and calculated post-fault voltage and current phasors. Compared to contemporary approaches present in the literature, the advantage of this algorithm is the ability to locate any fault regardless of the design and placement of the series compensation in the transmission line. The proposed method was validated with the application of several faults in a 500 [kV] transmission line with double circuit and series compensation simulated in ATP. The results indicate that this method provided accurate estimates of fault location on the transmission line, with errors less than 1%, using both steady-state and transient post-fault data. Furthermore, the proposed algorithm is robust even in situations of high resistance faults, errors in the transmission line parameters, and errors in phasor extraction, presenting itself as an accurate and reliable alternative to locate faults in transmission lines with series compensation. As a result of this thesis, the article entitled “Optimization-Based Fault Location Algorithm for Series-Compensated Power Transmission Lines” was published in the prestigious journal IEEE Access.

Keywords: Fault location. Optimization. Series-compensated lines.

Lista de figuras

Figura 1 – Linha de transmissão em curto com compensação série. Adaptado de (BAINS <i>et al.</i> , 2018).	44
Figura 2 – Linha de transmissão em curto com compensação série. Adaptado de (TAHERI; ESLAMI; DAMCHI, 2020).	47
Figura 3 – Diagrama dos passos de execução do método. Adaptado de (TAHERI; ESLAMI; DAMCHI, 2020).	48
Figura 4 – Linha de transmissão em curto com compensação série. Adaptado de (GHAZIZADEH-AHSAEE, 2020).	49
Figura 5 – Linha de transmissão em curto com compensação série. Adaptado de (MANASSERO JR; DI SANTO; ROJAS, 2016).	53
Figura 6 – Linha de transmissão em curto com compensação série. Adaptado de (NAIDU; PRADHAN, 2020).	56
Figura 7 – Sistema de transmissão com compensação.	59
Figura 8 – Curva da potência transferida em função da diferença angular entre barras, δ . P_{max}^{cs} é a potência máxima teórica após a inserção da compensação série.	60
Figura 9 – Formas de instalação da compensação série.	61
Figura 10 – Projeto básico de compensação série fixa (a) e compensação série controlada por tiristor (b).	62
Figura 11 – Fluxograma do algoritmo de otimização ED.	66
Figura 12 – Fluxograma do algoritmo de otimização EDD.	69
Figura 13 – Parâmetros de projeto de filtros passa-baixas de Butterworth	72
Figura 14 – Sincronização dos sinais por interpolação	72
Figura 15 – Seleção da janela de dados (nesse caso é escolhida a Janela 1). Sinais de corrente na relação 3000:1.	73
Figura 16 – (a) Circuito monofásico. (b) Grafo orientado do circuito.	77
Figura 17 – Circuito equivalente do gerador síncrono representado nas componentes de sequência positiva (1), negativa (2) e zero (0).	79

Figura 18 – Modelo π -equivalente da linha de transmissão	80
Figura 19 – Tipos de ligação dos transformadores trifásicos de dois enrolamentos e respectivos circuitos equivalentes em componentes simétricas.	83
Figura 20 – Representação geral de transformadores utilizando o modelo π , em valores por unidade.	84
Figura 21 – Circuito equivalente para a compensação série.	86
Figura 22 – Circuito equivalente para o banco de reatores.	86
Figura 23 – Circuito equivalente para a falta.	87
Figura 24 – Diagrama unifilar de uma rede elétrica genérica composta por uma linha de transmissão com Compensação Série (CS) em ambos os terminais, reatores e equivalentes. Os nós L , 1 , 2 e R representam nós trifásicos.	88
Figura 25 – Detalhe da linha de transmissão mostrada na Figura 24.	89
Figura 26 – Diagrama unifilar de uma rede elétrica genérica composta por uma linha de transmissão com CS ao longo de sua extensão, reatores e equivalentes. Os nós L , 1 , 2 e R representam nós trifásicos.	90
Figura 27 – Detalhe da linha de transmissão mostrada na Figura 26.	91
Figura 28 – Fluxograma da execução do método de localização de faltas para linhas de transmissão cuja compensação série está instalada nos terminais.	94
Figura 29 – Fluxograma da execução do método para o caso da CS em um ponto específico ao longo da linha	97
Figura 30 – Sistema de transmissão utilizado para avaliação do método.	100
Figura 31 – Perfil das torres dos dois circuitos da linha de transmissão.	100
Figura 32 – Modelo da compensação série (a), curva do metal-oxide varistor (MOV) em paralelo com o capacitor (b) e curva do MOV em paralelo com o reator de amortecimento (c).	102
Figura 33 – Erro médio da localização da falta para variação da distância de falta, com fasores extraídos em regime permanente pós-falta.	104
Figura 34 – Erro médio da localização da falta para variação da distância de falta. Faltas aplicadas em 0,2791 [s] com fasores extraídos no período transitório pós-falta.	105
Figura 35 – Erro médio da localização da falta para variação da distância de falta. Faltas aplicadas em 0,2833 [s] com fasores extraídos no período transitório pós-falta.	106
Figura 36 – Erro médio da localização da falta para variação da resistência de falta, com fasores extraídos em regime permanente pós-falta.	108
Figura 37 – Erro médio da localização da falta para variação da resistência de falta. Faltas aplicadas em 0,2791 [s] com fasores extraídos no período transitório pós-falta.	108

Figura 38 – Erro médio da localização da falta para variação da resistência de falta. Falta aplicada em 0,2833 [s] com fasores extraídos no período transitório pós-falta.	111
Figura 39 – Erros da distância de falta para faltas do tipo AT, com erros nos fasores, à 50% do terminal local, com resistências na combinação 5 (5;50) e com os fasores extraídos em regime permanente.	112
Figura 40 – Erros da distância de falta para faltas do tipo BCT, com erros nos fasores, à 50% do terminal local, com resistências na combinação 5 (5;50) e com os fasores extraídos em regime permanente.	112
Figura 41 – Erros da distância de falta para faltas do tipo BC, com erros nos fasores, à 50% do terminal local, com resistências na combinação 5 (5;50) e com os fasores extraídos em regime permanente.	113
Figura 42 – Erros da distância de falta para faltas do tipo ABCT, com erros nos fasores, à 50% do terminal local, com resistências na combinação 5 (5;50) e com os fasores extraídos em regime permanente.	113
Figura 43 – Erros da distância de falta para faltas do tipo AT, com erros nos parâmetros da linha, à 50% do terminal local, com resistências na combinação 5 (5;50) e com os fasores extraídos em regime permanente.	114
Figura 44 – Erros da distância de falta para faltas do tipo BCT, com erros nos parâmetros da linha, à 50% do terminal local, com resistências na combinação 5 (5;50) e com os fasores extraídos em regime permanente.	115
Figura 45 – Erros da distância de falta para faltas do tipo BC, com erros nos parâmetros da linha, à 50% do terminal local, com resistências na combinação 5 (5;50) e com os fasores extraídos em regime permanente.	115
Figura 46 – Erros da distância de falta para faltas do tipo ABCT, com erros nos parâmetros da linha, à 50% do terminal local, com resistências na combinação 5 (5;50) e com os fasores extraídos em regime permanente.	116
Figura 47 – Erros da distância de falta para faltas do tipo AT, com erros nos equivalentes, à 50% do terminal local, com resistências na combinação 5 (5;50) e com os fasores extraídos em regime permanente.	117
Figura 48 – Erros da distância de falta para faltas do tipo BCT, com erros nos equivalentes da linha, à 50% do terminal local, com resistências na combinação 5 (5;50) e com os fasores extraídos em regime permanente.	117
Figura 49 – Erros da distância de falta para faltas do tipo BC, com erros nos equivalentes da linha, à 50% do terminal local, com resistências na combinação 5 (5;50) e com os fasores extraídos em regime permanente.	118
Figura 50 – Erros da distância de falta para faltas do tipo ABCT, com erros nos equivalentes da linha, à 50% do terminal local, com resistências na combinação 5 (5;50) e com os fasores extraídos em regime permanente.	118

Lista de tabelas

Tabela 1	– Erro médio da localização da falta para variação da distância de falta, com fasores extraídos em regime permanente pós-falta.	104
Tabela 2	– Erro médio da localização da falta para variação da distância de falta. Faltas aplicadas em 0,2791 [s] com fasores extraídos no período transitório pós-falta.	105
Tabela 3	– Erro médio da localização da falta para variação da distância de falta. Faltas aplicadas em 0,2833 [s] com fasores extraídos no período transitório pós-falta.	106
Tabela 4	– Erro médio da localização da falta para variação da resistência de falta, com fasores extraídos em regime permanente pós-falta.	107
Tabela 5	– Erro médio da localização da falta para variação da resistência de falta. Faltas aplicadas em 0,2791 [s] com fasores extraídos no período transitório pós-falta.	109
Tabela 6	– Erro médio da localização da falta para variação da resistência de falta. Faltas aplicadas em 0,2833 [s] com fasores extraídos no período transitório pós-falta.	110
Tabela 7	– Erros na determinação da distância de falta considerando erros nos fasores. Faltas à 50% (128 [km]) do terminal local, com resistências na combinação 5 (5;50) e com os fasores extraídos em regime permanente. Todos os valores em (%).	111
Tabela 8	– Erros na determinação da distância de falta considerando erros nos parâmetros. Faltas à 50% (128 [km]) do terminal local, com resistências na combinação 5 (5;50) e com os fasores extraídos em regime permanente. Todos os valores em (%).	114
Tabela 9	– Erros na determinação da distância de falta considerando erros nos equivalentes. Faltas à 50% (128 [km]) do terminal local, com resistências na combinação 5 (5;50) e com os fasores extraídos em regime permanente. Todos os valores em (%).	116

Tabela 10 – Erros na distância da falta em (%) considerando diferentes algoritmos de otimização. Falta aplicadas no instante 0,2791 [s], à 50% (128 [km]) do terminal Local (L), resistência na combinação 5 (5;50) e fasores extraídos no período transitório pós-falta. 120

Lista de abreviaturas e siglas

AG	Algoritmos Genéticos
CS	Compensação Série
CSCT	Compensação Série Controlada por Tiristor
CSF	Compensação Série Fixa
CSs	Compensações Série
DJs	Disjuntores
ED	Evolução Diferencial
EDD	Evolução Diferencial Dinâmica
EMTP-ATP	Alternative Transient Program
EPUSP	Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
FACTS	<i>Flexible Alternating Current Transmission System</i>
FAPESP	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo
FFT	Transformada Rápida de Fourier
GPS	Global Positioning System
IED	<i>Intelligent Electronic Device</i>
L	Local

MOV	metal-oxide varistor
PEA	Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas
PS	<i>Pattern Search</i>
R	Remoto
RSs	Reatores <i>shunt</i>
SA	<i>Simulated Annealing</i>
SIN	Sistema Interligado Nacional
TCs	Transformadores de corrente
TIs	Transformadores de instrumentação
TPCs	Transformadores de potencial capacitivos

Lista de símbolos

\bar{Y}_0	Admitância de sequência zero do gerador
\bar{Y}_1	Admitância de sequência positiva do gerador
\bar{Y}_2	Admitância de sequência negativa do gerador
β	Coefficiente de combinação.
$\Delta\dot{V}_i^{MN}$	Queda de tensão no CS.
Δt	Passo de amostragem ou integração
\dot{E}_{a1}	Tensão interna de sequência positiva do gerador
\dot{I}_a	Corrente na fase a do gerador
\dot{I}_b	Corrente na fase b do gerador
\dot{I}_c	Corrente na fase c do gerador
\dot{I}_i^M	Corrente de sequência i no terminal M.
\dot{I}_i^R	Corrente de sequência i no terminal R.
\dot{I}_i^S	Corrente de sequência i no terminal S.
\dot{V}_{an}	Tensão na fase a do terminal do gerador
\dot{V}_{bn}	Tensão na fase b do terminal do gerador
\dot{V}_{cn}	Tensão na fase c do terminal do gerador
\dot{V}_i^M	Tensão de sequência i no terminal M.
\dot{V}_i^R	Tensão de sequência i no terminal R.

\dot{V}_i^S Tensão de sequência i no terminal S.

ℓ Comprimento total da linha.

ℓ_{AB} Comprimento total da linha.

ϵ Valor da função objetivo.

γ Probabilidade de cruzamento.

γ_i Autovalor correspondente ao i -ésimo autovetor de \mathbf{P}

λ_k Polos da função $\hat{v}(t)$

$[\cdot]_D$ Notação para matriz diagonal.

$[\bar{Z}_{eq}]_{L,sc}$ são as impedâncias equivalentes da CS instalada no terminal L.

$[\bar{Z}_{eq}]_{R,sc}$ são as impedâncias equivalentes da CS instalada no terminal R.

$[\dot{I}_{abc}]_L$ são as correntes no terminal L.

$[\dot{I}_{abc}]_R$ são as correntes no terminal R.

$[\dot{V}_{abc}]_L$ são as tensões no terminal L.

$[\dot{V}_{abc}]_R$ são as tensões no terminal R.

ABCD Matrizes das constantes do quadripolo da linha de transmissão.

I Matriz identidade.

M Autovetores de $\mathbf{P} = \mathbf{yz}$.

Q Matriz de incidências.

T Matriz de transformação de componentes simétricas em componentes de fase

X₀ População inicial do processo de otimização.

x_{otm} Indivíduo ótimo do processo de otimização.

Y_{bus} Matriz de admitâncias nodal.

Y_C Matriz de admitâncias primitivas, em componentes de fase, da compensação série.

Y_F Matriz de admitâncias primitivas, em componentes de fase, da falta.

Y_G Matriz de admitâncias primitiva do gerador.

Y_L Matriz de admitâncias primitivas, em componentes de fase, do banco de reatores.

\mathbf{y}	Matriz de admitância <i>shunt</i> por unidade de comprimento da linha de transmissão.
\mathbf{z}	Matriz de impedância serie por unidade de comprimento da linha de transmissão.
$\mathbf{Y}_{\mathbf{LR}}$	Matriz das admitâncias primitivas série de cada fase da linha.
$\mathbf{y}_{\mathbf{ps}}$	Matriz de admitâncias primitivas série equivalente do transformador.
$\mathbf{y}_{\mathbf{p}}$	Matriz de admitâncias primitivas <i>shunt</i> equivalente do lado primário do transformador.
$\mathbf{Y}_{\mathbf{shL}}$	Matriz das admitâncias primitivas <i>shunt</i> do lado do terminal local da linha.
$\mathbf{Y}_{\mathbf{shR}}$	Matriz das admitâncias primitivas <i>shunt</i> do lado do terminal remoto da linha.
$\mathbf{y}_{\mathbf{s}}$	Matriz de admitâncias primitivas <i>shunt</i> equivalente do lado secundário do transformador.
$\mathbf{I}_{\mathbf{L}}$	Vetor de correntes entrando no terminal local da linha de transmissão.
$\mathbf{I}_{\mathbf{R}}$	Vetor de correntes saindo do terminal remoto da linha de transmissão.
$\mathbf{V}_{\mathbf{L}}$	Vetor de tensões de fase no terminal local da linha de transmissão.
$\mathbf{V}_{\mathbf{R}}$	Vetor de Tensões de fase no terminal remoto da linha de transmissão.
ν	Velocidade de propagação da onda.
ν_n	Velocidade da onda para o modo n
ω_1	Frequência angular da componente fundamental do sinal
ω_k	frequência angular da componente componente transitória do sinal
ω_m	Frequência angular da componente harmônica múltipla inteira da fundamental
τ_n	Tempo para viajar de S até o ponto de falta
τ_k	constante de decaimento da componente transitória do sinal
θ_1	Fase da componente fundamental do sinal
θ_k	fase da componente componente transitória do sinal
θ_m	Fase da componente harmônica múltipla inteira da fundamental
$\hat{v}(t)$	Função aproximadora de $v(t)$
a_1	Amplitude da componente fundamental do sinal
a_m	Amplitude da componente harmônica múltipla inteira da fundamental

B_k	Metade da amplitude das componentes de $\hat{v}(t)$
b_k	amplitude da componente transitória do sinal
d	Distância da falta em relação ao terminal S.
d_1	Distância da falta ocorrida no trecho esquerdo da linha.
h	Número da amostra
i	Índice de referência às sequências zero (0), positiva (1) e negativa (2).
i_n^R	Corrente modal no terminal R
i_n^S	Corrente modal no terminal S
i_n^{xS}	Corrente modal do lado esquerdo da falta
k	Ordem da componente transitória do sinal
m	Ordem da componente harmônica múltipla inteira da fundamental
N	Número de amostras
N_p	Número de indivíduos utilizados pelo método de otimização.
N_{max}	Número máximo de iterações.
q	Posição relativa da CS.
R_f	Resistência de falta
$s(t)$	Sinal com as componentes fundamental, harmônica inteira e aperiódica
$s_{med}(t)$	Média do sinal $s(t)$
$s_{med}^k(t)$	Média da componente k do sinal $s(t)$
T	Período de um ciclo da componente fundamental
t	Tempo
T_n^S	Tempo necessário para a onda viajar de R para B
T_n^E	Tempo necessário para a onda viajar de S para E
t_{0A}	Instante de ocorrência da falta registrados no terminal A.
t_{0B}	Instante de ocorrência da falta registrados no terminal B.
v_n^R	Tensão modal no terminal R

v_n^S	Tensão modal no terminal S
v_n^{xS}	Tensão modal do lado esquerdo da falta
Z_{cn}	Impedância característica da linha no modo n
γ_i	Constante de propagação de sequência i da linha de transmissão.
R_n^E	Resistência do trecho entre E e a falta
R_n^R	Resistência do trecho entre R e B
R_n^S	Resistência do trecho entre S e a falta
\bar{Z}_{c_i}	Impedância característica de sequência i da linha de transmissão.
$\tilde{\theta}_k$	Fase da componente k do valor médio do sinal $s(t)$
\tilde{b}_k	Amplitude da componente k do valor médio do sinal $s(t)$
\dot{I}_{aL}	Corrente entrando na fase a do terminal local da linha de transmissão.
\dot{I}_{aR}	Corrente saindo da fase a do terminal remoto da linha de transmissão.
\dot{I}_{bL}	Corrente entrando na fase b do terminal local da linha de transmissão.
\dot{I}_{bR}	Corrente saindo da fase b do terminal remoto da linha de transmissão.
\dot{I}_{cL}	Corrente entrando na fase c do terminal local da linha de transmissão.
\dot{I}_{cR}	Corrente saindo da fase c do terminal remoto da linha de transmissão.
\dot{V}_{anL}	Tensão na fase a do terminal local da linha de transmissão.
\dot{V}_{anR}	Tensão na fase a do terminal remoto da linha de transmissão.
\dot{V}_{bnL}	Tensão na fase b do terminal local da linha de transmissão.
\dot{V}_{bnR}	Tensão na fase b do terminal remoto da linha de transmissão.
\dot{V}_{cnL}	Tensão na fase c do terminal local da linha de transmissão.
\dot{V}_{cnR}	Tensão na fase c do terminal remoto da linha de transmissão.

Sumário

1	INTRODUÇÃO	23
1.1	Objetivo	23
1.2	Motivação	23
1.3	Estrutura do trabalho	25
2	EXPERIÊNCIA EM LOCALIZAÇÃO DE FALTAS	27
2.1	Artigo 1: Localização de faltas em linhas de transmissão com múltiplas derivações utilizando dados de somente dois terminais	29
2.2	Artigo 2: Fault Location Method for Untransposed Transmission Lines with Derivations	31
2.3	Artigo 3: Fault location method applied to transmission lines of general configuration	32
2.4	Artigo 4: Localização de Faltas em Linhas de Transmissão Baseada em Métodos Heurísticos Usando Dados de Um Terminal	32
2.5	Artigo 5: Fault location in series-compensated transmission lines based on heuristic method	33
2.6	Artigo 6: Heuristic Method for Fault Location in Distribution Feeders With the Presence of Distributed Generation	35
2.7	Artigo 7: Localização de faltas em alimentadores de distribuição utilizando computação distribuída e algoritmo heurístico	36
2.8	Artigo 8: Aplicação do Método de Simples Reatância e Takagi na Localização de Falta em uma Rede de Média Tensão de um Parque Eólico	38
3	ESTADO DA ARTE EM LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM LINHAS COMPENSADAS	39
4	COMPENSAÇÃO SÉRIE	59
5	ALGORITMO DE OTIMIZAÇÃO EVOLUÇÃO DIFERENCIAL	64
5.1	Algoritmo Evolução Diferencial clássica	65
5.2	Algoritmo Evolução Diferencial Dinâmica	67

6	METODOLOGIA DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO COMPENSADAS	70
6.1	Filtragem, sincronização e extração dos fasores dos sinais de tensão e corrente	71
6.2	Modelagem da rede elétrica	77
6.2.1	Geradores síncronos e equivalentes de rede	78
6.2.2	Linhas de transmissão	80
6.2.3	Transformadores	82
6.2.4	Compensação série	85
6.2.5	Banco de reatores <i>shunt</i>	86
6.2.6	Faltas	87
6.3	Localização da falta	87
6.3.1	Preparação da rede para a localização da falta em linhas com compensação nos terminais	88
6.3.2	Preparação da rede para a localização da falta em linhas com compensação ao longo de sua extensão	90
6.3.3	Processo de localização da falta	92
6.3.3.1	Casos com a compensação série instalada nos terminais da linha de transmissão	93
6.3.3.2	Casos com a compensação série instalada ao longo da linha de transmissão	95
7	AVALIAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA	99
7.1	Descrição do sistema de transmissão e dos casos de falta	99
7.2	Resultados das simulações	101
7.2.1	Análise de precisão	103
7.2.1.1	Variação da distância de falta	103
7.2.1.2	Variação da resistência de falta	105
7.2.1.3	Comentários adicionais	107
7.2.2	Análise de sensibilidade	109
7.2.2.1	Erros na extração de fasores	109
7.2.2.2	Erros nos parâmetros da linha de transmissão	111
7.2.2.3	Erros nos equivalentes dos terminais e de transferência	114
7.2.2.4	Comentários adicionais	116
7.2.3	Análise dos algoritmos de otimização	119
8	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	121
	REFERÊNCIAS	123

APÊNDICES

128

APÊNDICE A – MÉTODO DE PRONY 129

Introdução



1.1 Objetivo

O objetivo desta tese é desenvolver um método robusto de localização de faltas em linhas de transmissão de energia elétrica com compensação série, utilizando técnicas de otimização heurística e fasores dos sinais de tensão e corrente medidos em ambos os terminais da linha de transmissão.

Diante dos desafios inerentes da localização de faltas em linhas de transmissão cuja compensação série está presente, tal método deve responder de forma precisa e confiável na localização das faltas sem a necessidade de conhecimento prévio das informações da compensação série e também em situações críticas, tais como faltas com alta resistência e presença de erros nos parâmetros da linha e na extração dos fasores.

1.2 Motivação

O consumo de energia elétrica no país tende a aumentar, em média, 3,1% ao ano considerando o período de 2019 a 2030, valor maior do que o crescimento econômico projetado no mesmo período, de 2,1% ao ano. O principal setor responsável por este incremento no consumo de energia é o industrial, devido à premissa da gradual retomada de utilização de sua capacidade ociosa causada pela crise da pandemia do novo coronavírus (Ministério de Minas e Energia; Empresa de Pesquisa Energética, 2021).

Diante da crescente demanda por energia elétrica, é constante a busca por meios de aumentar a capacidade de suprimento de energia aos centros consumidores, mantendo a estabilidade, segurança e confiabilidade necessárias.

O sistema de transmissão de energia elétrica é um elo essencial entre geração e consumo. Sua expansão é relevante para garantir a segurança e o aumento da flexibilidade

operacional do Sistema Interligado Nacional (SIN) e também minimizar restrições de escoamento de energia entre seus sub-mercados, permitindo alocar recursos de geração de forma mais eficiente. Além disso, uma vez que os agentes de mercado têm livre acesso à rede, propicia um ambiente de competição na geração e comercialização de energia elétrica (Ministério de Minas e Energia; Empresa de Pesquisa Energética, 2020).

Segundo (Ministério de Minas e Energia; Empresa de Pesquisa Energética, 2020), o desenvolvimento dos seguintes itens estão entre as principais perspectivas tecnológicas para aprimoramento do sistema de transmissão brasileiro:

- tecnologias aplicáveis à sistemas subterrâneos e submarinos;
- novas funções de controle e interação para equipamentos *Flexible Alternating Current Transmission System* (FACTS);
- equipamentos com utilização de supercondutores;
- novas estruturas, condutores e isoladores considerando o surgimento de novas tecnologias e redução de impactos ambientais;
- tecnologias aplicáveis à equipamentos de alta tensão e soluções para compactação de subestações;
- ferramentas para operação e manutenção, tais como sistemas de apoio à tomada de decisão em tempo real, detecção de falhas e operação remota;
- sistemas mais avançados para proteção do sistema elétrico;
- ferramentas de sensoriamento e monitoramento avançadas para apoio à implementação das redes elétricas inteligentes.

O sistema de transmissão de energia elétrica brasileiro tem, em 2022, 145.600 km de extensão, sendo 87,1% de transmissão em corrente alternada. Projeções apontam que em 2025 o Brasil terá um aumento de 26,4% em extensão das linhas, cuja participação da transmissão em corrente alternada será incrementada, passando a ser de 89,8% (Operador Nacional do Sistema Elétrico, 2022).

Diante da predominância de linhas de transmissão em corrente alternada no país e da necessidade de aprimoramento do seu desempenho, a compensação série vem sendo utilizada ao longo do tempo. Por meio da inserção de banco de capacitores em série com a linha de transmissão, a capacidade de transmissão de energia aumenta, uma vez que a mesma está intimamente relacionada à reatância das linhas de transmissão e às tensões entre seus barramentos (KUNDUR, 1994; ZHANG *et al.*, 2017a). A compensação série também pode ser realizada com a utilização de FACTS, cuja tecnologia é citada como uma

das perspectivas tecnológicas pelo (Ministério de Minas e Energia; Empresa de Pesquisa Energética, 2020).

A utilização de capacitores em série com a linha de transmissão apresenta vantagens tais como: redução das distâncias elétricas entre as barras, o que, reduzindo a reatância série da linha, aumenta a capacidade de transmissão de potência ativa e reduz a potência reativa; aprimoramento da estabilidade em regime transitório e permanente; e redução de perdas na ocorrência de perturbações.

Dada a importância do sistema de transmissão, qualquer interrupção em seu funcionamento pode acarretar prejuízos no fornecimento de energia aos centros consumidores. Desta forma, ressalta-se a necessidade de métodos eficazes para localização e tratamento de faltas que podem ocorrer nas linhas de transmissão, tema que vai de encontro à uma das perspectivas tecnológicas apontadas pelo (Ministério de Minas e Energia; Empresa de Pesquisa Energética, 2020).

Embora a compensação série aprimore a transmissão de energia a longas distâncias e promova o aumento de sua capacidade, a mesma também traz desafios aos algoritmos de localização de faltas devido à indução de um comportamento não linear, indesejável, ao sistema (BAINS *et al.*, 2018).

Desta forma, a localização precisa de faltas em linhas de transmissão com compensação série é desafiadora. Na literatura foram encontradas diversas deficiências nos métodos existentes, tais como: necessidade de utilização de dados de tensão e corrente somente após o curto-circuito da compensação série; necessidade de conhecimento prévio das características do MOV e da compensação série; inviabilidade de aplicação a qualquer tipo de falta, principalmente quando a curva do MOV não é utilizada; e limitações relacionadas à posição da compensação série na linha para localização de falta.

Diante desse contexto, a motivação deste trabalho foi desenvolver um método robusto de localização de faltas em linhas de transmissão com compensação série que sanasse todas as deficiências apontadas, além de localizar qualquer tipo de falta com precisão e eficácia, tanto em regime permanente quanto em regime transitório.

1.3 Estrutura do trabalho

O trabalho está estruturado da seguinte forma:

- **Capítulo 1:** Apresenta a introdução do trabalho, contendo objetivo, motivação e a estrutura do mesmo.
- **Capítulo 2:** Apresenta a experiência do autor da tese no tema de localização de faltas.

-
- **Capítulo 3:** Apresenta o estado da arte sobre linhas de transmissão com compensação série.
 - **Capítulo 4:** Apresenta a conceituação sobre compensação série.
 - **Capítulo 5:** Apresenta a conceituação sobre algoritmos de otimização, considerando métodos baseados em derivadas e métodos heurísticos.
 - **Capítulo 6:** Descreve a metodologia de localização de faltas em linhas com compensação série.
 - **Capítulo 7:** Apresenta a avaliação da metodologia proposta.
 - **Capítulo 8:** Traz as conclusões do trabalho.

Experiência em localização de faltas

2

Este capítulo apresenta a experiência do pesquisador no tema de localização de faltas. O autor desta tese de Livre Docência pesquisa na área de localização de faltas desde 2008, quando ingressou no programa de Mestrado em Sistemas de Potência do Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas (PEA) da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP). Ao longo dos anos, vem aprimorando sua pesquisa no tema, tendo cinco publicações em periódicos indexados e quatro artigos em congressos, nacionais e internacionais, relevantes. Além disso, sua tese de doutorado (DI SANTO, 2012) também tratou do tema de localização de faltas. A seguir, sua trajetória de pesquisa nessa temática é apresentada.

O autor ingressou no Programa de Mestrado em Sistemas de Potência do PEA/EPUSP em 2008 e iniciou sua pesquisa em localização de faltas em linhas de transmissão. O título da Dissertação de Mestrado defendida é “Localização de Faltas em Linhas De Transmissão com Múltiplas Derivações Utilizando Dados de Somente Dois Terminais” (DI SANTO, 2010). Como fruto deste trabalho, o artigo “Localização de faltas em linhas de transmissão com múltiplas derivações utilizando dados de somente dois terminais” foi publicado no periódico Controle & Automação (DI SANTO; PEREIRA; ZANETTA JR, 2011), cuja classificação é Qualis B1.

Em seguida, o autor ingressou no Programa de Doutorado em Sistemas de Potência do PEA/EPUSP, em 2010. O título da Tese de Doutorado defendida é “Localização de Faltas em Linhas de Transmissão com Derivações, Constituídas por Circuito Duplo e Trechos Não Transpostos” (DI SANTO, 2012). Este trabalho originou a publicação do artigo intitulado “Fault Location Method for Untransposed Transmission Lines with Derivations” no congresso internacional 2012 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (DI SANTO; PEREIRA, 2012).

Em agosto de 2013, o pesquisador iniciou sua função docente na Universidade de

São Paulo como Professor Doutor do PEA e continuou sua pesquisa em Localização de Faltas. Suas pesquisas deram origem a publicação do artigo intitulado “Fault location method applied to transmission lines of general configuration” na *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* (DI SANTO; PEREIRA, 2015), periódico indexado com Qualis A1. Também, foi publicado um artigo no congresso internacional XI Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission, intitulado “Localização de Faltas em Linhas de Transmissão Baseada em Métodos Heurísticos Usando Dados de Um Terminal” (FUENTES; MANASSERO JR; DI SANTO, 2015).

No período de 2015 a 2017, coordenou um projeto de pesquisa regular da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) intitulado “Localização de faltas em redes de distribuição, com injeção de geração distribuída, utilizando computação paralela”. Como frutos deste projeto, pode-se citar a publicação de dois artigos em periódicos indexados com classificação Qualis A1: “Fault location in series-compensated transmission lines based on heuristic method” na *Electric Power Systems Research* (MANASSERO JR; DI SANTO; ROJAS, 2016) e “Heuristic Method for Fault Location in Distribution Feeders With the Presence of Distributed Generation” na *IEEE Transactions on Smart Grid* (MANASSERO JR; DI SANTO; SOUTO, 2017), além de um artigo publicado em congresso nacional intitulado “Localização de faltas em alimentadores de distribuição utilizando computação distribuída e algoritmo heurístico” no XXII Congresso Brasileiro de Automática (DE AGUIAR *et al.*, 2018).

Em seguida, foi publicado outro artigo em congresso nacional cujo título é “Aplicação do Método de Simples Reatância e Takagi na Localização de Falta em uma Rede de Média Tensão de um Parque Eólico” no XVII Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica (PEIXOTO *et al.*, 2020).

Posteriormente, o artigo intitulado “Optimization-Based Fault Location Algorithm for Series-Compensated Power Transmission Lines” foi publicado na conceituada revista *IEEE Access* (DI SANTO; ALBERTINI; TIFERES, 2022), fruto desta Tese de Livre Docência.

Os itens a seguir apresentam um resumo de cada publicação do pesquisador no tema de localização de faltas em ordem cronológica. Vale ressaltar que o resumo do artigo (DI SANTO; ALBERTINI; TIFERES, 2022) não é apresentado neste capítulo, uma vez que seu conteúdo é contemplado por esta tese de Livre Docência.

2.1 Artigo 1: Localização de faltas em linhas de transmissão com múltiplas derivações utilizando dados de somente dois terminais

Em (DI SANTO; PEREIRA; ZANETTA JR, 2011) foi desenvolvido um método de localização de faltas em linhas de transmissão continuamente transpostas e com múltiplas derivações. O método utiliza os fasores de tensão e corrente, pré-falta e pós-falta, dos terminais local e remoto, medidos em regime permanente, para determinar as informações da falta, tais como: trecho de ocorrência, distância e resistência.

O método proposto tem início com a entrada das seguintes informações:

- dados da linha de transmissão: impedâncias, admitâncias e comprimento de cada trecho;
- dados dos transformadores: potência aparente e reatância de curto-circuito percentual;
- dados de tensão e corrente, pré-falta e pós-falta, medidos nos terminais local e remoto;
- referências de carga leve, média e pesada; e
- tipo e instante de ocorrência da falta.

Em seguida, o método realiza três etapas consecutivas:

- cálculo dos equivalentes nos terminais local e remoto da linha;
- estimativa da impedância das cargas; e
- localização da falta.

Os equivalentes nos terminais, que correspondem à uma impedância e uma fonte de tensão em série, são estimados por meio das componentes simétricas das tensões e correntes, pré-falta e pós-falta, medidas nos terminais local e remoto.

Na etapa de estimativa de cargas é utilizado um algoritmo composto por duas fases. Na primeira fase é realizada uma estimativa inicial das impedâncias da carga e na segunda fase é realizada a estimativa final.

Na estimativa de inicial, a potência ativa total fornecida pela linha é calculada e comparada com as referências de carga leve, média e pesada. Em seguida, são calculadas as estimativas de potência aparente das cargas, correntes nos trechos da rede e perdas ativas na rede e nos transformadores, além das perdas totais. Posteriormente, a potência

ativa total fornecida às cargas é obtida subtraindo as perdas ativas da potência ativa total fornecida pela rede. Novamente, estimam-se as potências aparentes das cargas, e a partir das mesmas, é possível estimar as impedâncias das cargas.

Na estimativa final de cargas, as impedâncias que foram calculadas na etapa inicial são utilizadas como entrada para a função objetivo que é minimizada pela função de otimização *Pattern Search* (PS). A função objetivo consiste em calcular os erros entre os fasores de tensão e corrente pré-falta medidos e os calculados pelo algoritmo, nos terminais local e remoto da linha. O processo de minimização da função objetivo utiliza o sistema de equações nodais da rede elétrica, em componentes simétricas, para calcular as correntes e as tensões nos terminais, tomando como variáveis a parte real e imaginária das impedâncias das cargas.

Na etapa de localização da falta, o método proposto entrega como resultado o trecho de ocorrência, a distância e a resistência da falta. Tal método utiliza dois processos relacionados entre si: a varredura da rede e a minimização de uma função objetivo, a partir da qual são determinadas as informações da falta.

O processo de varredura da rede consiste no controle da busca pela falta em cada trecho da rede. Inicialmente, o primeiro trecho da linha de transmissão é analisado, sendo aplicado a ele o processo de minimização da função objetivo, explicada no parágrafo a seguir, resultando nos dados de resistência e distância da falta naquele trecho, além da identificação do trecho e valor resultante da minimização da função objetivo. Posteriormente, o segundo trecho da linha de transmissão é analisado da mesma forma. Em seguida, os valores resultantes da minimização da função objetivo do primeiro e segundo trecho são comparados, e o menor caso é mantido, tornando-se o trecho referência. O processo segue para analisar o terceiro trecho da linha e compará-lo ao trecho referência, sendo isto realizado até o último trecho da linha de transmissão. Desta forma, ao final do processo, o trecho referência corresponde ao local de falta ocorrido, e suas informações de falta estão disponíveis.

O processo de minimização da função objetivo, o qual determina as informações de distância e resistência da falta, consiste em minimizar os erros entre os fasores de tensão e corrente pós-falta medidos e os calculados pelo algoritmo, nos terminais local e remoto da linha. Como no caso da estimativa da impedância das cargas, neste processo é utilizada a função de otimização PS. O processo de minimização da função objetivo utiliza o sistema de equações nodais da rede elétrica, em componentes simétricas, para calcular as correntes e as tensões nos terminais, tomando como variáveis a distância e a resistência da falta.

O método proposto se mostrou eficiente e preciso na obtenção das informações de falta frente a variações de distância, tipo e resistência de falta, cujas simulações foram realizadas no programa EMTP-ATP.

2.2 Artigo 2: Fault Location Method for Untransposed Transmission Lines with Derivations

Em (DI SANTO; PEREIRA, 2012) é proposta uma evolução do método de localização de faltas desenvolvido em (DI SANTO; PEREIRA; ZANETTA JR, 2011), o qual é aplicado somente ao caso de linhas perfeitamente transpostas e com circuito simples. Em (DI SANTO; PEREIRA, 2012) é apresentado um método de localização de faltas mais abrangente, que contempla, além de linhas de transmissão transpostas, também os casos de linhas não-transpostas. O método se baseia nos fasores de tensão e corrente, pré-falta e pós-falta, dos terminais local e remoto medidos em regime permanente para determinar as informações da falta, tais como: trecho de ocorrência, distância e resistência.

A principal diferença entre os métodos desenvolvidos em (DI SANTO; PEREIRA; ZANETTA JR, 2011) e em (DI SANTO; PEREIRA, 2012) está no processo de minimização da função objetivo, tanto para a estimativa das cargas quanto para a localização da falta. Como no método anterior, este novo método também calcula as tensões e correntes de pré-falta e pós-falta utilizando o sistema de equações nodais da rede elétrica. No entanto, a construção deste sistema leva em consideração os modelos de linha não-transpostas, trazendo um avanço significativo na aplicação do método de localização de faltas em casos mais complexos. O novo método necessita de tais informações de entrada:

- dados da linha de transmissão: impedâncias, admitâncias e comprimento de cada trecho;
- dados dos transformadores: potência aparente e reatância de curto-circuito percentual;
- dados de tensão e corrente, pré-falta e pós-falta, medidos nos terminais local e remoto;
- referências de carga leve, média e pesada; e
- tipo e instante de ocorrência da falta.

Além disso, o método, também, contempla a realização de três etapas consecutivas: cálculo dos equivalentes nos terminais local e remoto da linha, estimativa de cargas e localização da falta. Porém, como mencionado a função objetivo e o processo de minimização desta foram expandidos, em relação ao método desenvolvido em (DI SANTO; PEREIRA; ZANETTA JR, 2011), para tratar os casos de linhas de transmissão supracitados.

2.3 Artigo 3: Fault location method applied to transmission lines of general configuration

Em (DI SANTO; PEREIRA, 2015) é apresentado um método de localização de faltas em linhas de transmissão de qualquer configuração, podendo ser transpostas, não-transpostas, com múltiplas derivações e inclusive com circuito duplo. Este novo método é uma evolução substancial do método previamente desenvolvido em (DI SANTO; PEREIRA, 2012), ambos relacionados à tese de doutorado do pesquisador (DI SANTO, 2012).

Tal método se baseia nos fasores de tensão e corrente, pré-falta e pós-falta, dos terminais local e remoto medidos em regime permanente para determinar as informações da falta, como: trecho de ocorrência, distância e resistência. Contempla a realização de três etapas consecutivas: cálculo dos equivalentes nos terminais local e remoto da linha, estimativa de cargas e localização da falta. A etapa de localização da falta utiliza os processos de varredura da rede e minimização da função objetivo do algoritmo, ambos relacionados entre si.

As principais diferenças entre os métodos desenvolvidos em (DI SANTO; PEREIRA, 2012) e em (DI SANTO; PEREIRA, 2015) estão na etapa de localização da falta. O processo de varredura da rede foi expandido para tratar linhas de transmissão com circuito duplo. Já a função objetivo do algoritmo se tornou mais complexa com a inclusão de informações sobre circuito duplo e linhas não-transpostas. Tais aprimoramentos trouxeram um avanço significativo na aplicação do método de localização de faltas em casos mais complexos. Além disso, foram realizadas diversas simulações adicionais incluindo linhas de transmissão com circuito duplo para comprovar a precisão e a eficiência do método proposto, inclusive frente a casos com faltas de alta impedância.

2.4 Artigo 4: Localização de Faltas em Linhas de Transmissão Baseada em Métodos Heurísticos Usando Dados de Um Terminal

Em (FUENTES; MANASSERO JR; DI SANTO, 2015) foi proposto um método de localização de faltas para linhas de transmissão utilizando dados de somente um terminal. O método é baseado nos fasores de tensão e corrente e utiliza os algoritmos de otimização PS e Algoritmos Genéticos (AG) para minimizar uma função objetivo e, então, determinar o ponto de ocorrência da falta.

A função objetivo é a diferença entre as tensões calculadas no ponto da falta com os dados do terminal local e calculadas por estimativas dos dados do terminal remoto. Isto é, o método utiliza os dados do terminal local para estimar o valor da tensão da fonte do equivalente de Thévenin do terminal remoto e, assim, inferir a tensão neste terminal.

Para estimar a tensão da fonte equivalente de Thévenin, o método utiliza os fasores de tensão e corrente pré-falta do terminal local da linha e os seus parâmetros de quadripolo. Em seguida, para inferir a tensão pós-falta no terminal remoto da linha, o método utiliza o sistema de equações nodais, onde é utilizada a matriz de admitâncias do sistema de transmissão.

No sistema de equações nodais, a admitância da falta, cujo valor é desconhecido e, portanto, é utilizado um valor inicial, entra no cálculo da tensão pós-falta do terminal remoto, que acaba sendo uma estimativa que deve ser corrigida à medida que a função objetivo é minimizada.

Assim, utilizando a tensão inferida para o terminal remoto e, por consequência, também a corrente, juntamente com o quadripolo da linha de transmissão entre o terminal remoto e o ponto da falta, é calculada a tensão no ponto da falta a partir dos dados inferidos do referido terminal.

O outro valor para a tensão no ponto da falta é calculada com as tensões e correntes pós-falta do terminal local e o quadripolo da linha entre este terminal e o ponto da falta.

O processo de minimização da função objetivo, então, possui como variáveis a distância e a resistência da falta, sendo esta última utilizada na inferência da tensão pós-falta do terminal remoto. Ao final do processo, a distância da falta, em relação ao terminal local da linha, é obtida.

2.5 Artigo 5: Fault location in series-compensated transmission lines based on heuristic method

Em (MANASSERO JR; DI SANTO; ROJAS, 2016) é apresentado um método de localização de faltas em linhas de transmissão de circuito simples ou duplo, com a presença de compensação série. A compensação pode estar localizada tanto em ambos os terminais da linha de transmissão, quanto no meio da mesma. O método é baseado em otimização heurística e utiliza medições de tensão e corrente nos dois terminais da linha para calcular as tensões no local exato da falta, determinando a distância da mesma. A implementação do método foi realizada no Matlab e a testado por meio de simulações no EMTP-ATP.

A utilização de compensação série em linhas de transmissão é comum, pois eleva a capacidade de transmissão, a margem de estabilidade transitória e, no caso de linhas com circuito duplo, o balanceamento da cargas, postergando a necessidade de construção de novas linhas de transmissão. Porém, a localização de faltas em linhas compensadas é uma tarefa desafiadora, pois a inserção de componentes de proteção em paralelo com os capacitores, como MOV, empregam características não lineares ao sistema.

No método proposto, inicialmente a impedância da compensação série e a linha de

transmissão são modeladas. Em seguida, é definido o modo de análise do método, a qual é dependente da configuração da linha de transmissão e do local da compensação série.

Nas linhas de transmissão com circuito simples e compensação série presente nos dois terminais, *Intelligent Electronic Devices* (IEDs) realizam a medição de tensão e corrente nos terminais, sendo sincronizada ou não no tempo. Em seguida, os fasores de tensão e corrente, pós-falta, são estimados no ponto exato da falta, tanto vistos do terminal local quanto do remoto, obtendo-se, desta forma, um par de tensão e outro de corrente no ponto da falta.

Os fasores de tensão e corrente no local da falta são calculados utilizando o modelo da linha de transmissão e a medição de tensão e corrente do terminal correspondente, descontada a queda de tensão ocorrida na compensação série.

A soma das correntes calculadas no ponto da falta, vistas do terminal local e remoto, fornece a corrente de falta, porém, como a mesma é previamente desconhecida, não é utilizada pelo método. No entanto, os fasores de tensão calculados, vistos dos terminais local e remoto, são idealmente idênticos no ponto exato de ocorrência da falta e, conseqüentemente, a diferença entre elas deve ser nula. Desta forma, utilizou-se o método de otimização PS para minimizar as diferenças, tendo como variável a distância de falta. Assim, o local da falta é determinado.

No caso das linhas de transmissão com circuito simples e compensação série presente no meio da linha, o algoritmo divide a linha de transmissão em duas partes e faz uma investigação em cada uma, similar à realizada na linha com compensação série em ambos os terminais. Em seguida, o resultado da minimização da função objetivo em cada parte da linha de transmissão é comparado, sendo eleito o local da falta o de menor erro de minimização.

Já no caso das linhas de transmissão com circuito duplo e compensação série em ambos os terminais ou no meio da linha, o procedimento é similar aos casos de linhas com circuito simples, porém é considerado o acoplamento magnético entre os seis condutores da linha de transmissão.

Foram realizadas diversas simulações no EMTP-ATP em uma linha de transmissão com circuito duplo e compensação série instalada em ambos os terminais, onde se comprovou a eficiência e precisão do método proposto, inclusive na análise de sensibilidade conduzida com a inserção de erros nos parâmetros da linha de transmissão, nos fasores e na sincronização do tempo.

2.6 Artigo 6: Heuristic Method for Fault Location in Distribution Feeders With the Presence of Distributed Generation

Em (MANASSERO JR; DI SANTO; SOUTO, 2017) é apresentado um método de localização de faltas heurístico para redes de distribuição com geração distribuída. O método é baseado em (DI SANTO; PEREIRA, 2015), que foi atualizado e compatibilizado para trabalhar em redes de distribuição com a inserção de geração distribuída, cujas características relevantes são a presença de muitos trechos e intermitência na injeção de energia elétrica na rede, que acarreta no aumento no conteúdo harmônico e níveis de falha.

O método utiliza como dados de entrada os modelos dos alimentadores da rede de distribuição e os circuitos equivalentes das unidades de geração distribuída, ambos disponibilizados pela distribuidora. Além destes, também a impedância das cargas e o equivalente no terminal da subestação, estimados por meio das medições de tensão e corrente no terminal da subestação.

Este método se baseia nos fasores de tensão e corrente, pré-falta e pós-falta, do terminal da subestação medidos em regime permanente para determinar as informações da falta, como: trecho de ocorrência, distância e resistência. Contempla a realização de três etapas consecutivas: cálculo dos equivalentes no terminal da subestação, estimativa de cargas e localização da falta.

As principais diferenças entre os métodos desenvolvidos em (DI SANTO; PEREIRA, 2015) e em (MANASSERO JR; DI SANTO; SOUTO, 2017) estão na etapa de localização da falta, que é composta pelos processos de varredura da rede e minimização da função objetivo, ambos relacionados entre si. O processo de varredura em (MANASSERO JR; DI SANTO; SOUTO, 2017) utiliza o conceito de tabela pai-filho. Uma vez que a rede de distribuição possui muitos trechos, esta abordagem possibilita uma análise mais organizada, garantindo que nenhum trecho da rede deixe de ser analisado, além de facilitar a análise dos resultados.

Já no processo de minimização da função objetivo, o qual determina as informações de distância e resistência da falta, foi realizada a inclusão dos modelos de geração distribuída no sistema de equações nodais da rede elétrica, em componentes simétricas. Neste processo é utilizada a função de otimização PS para minimizar uma função objetivo que calcula os erros entre os fasores de tensão e corrente pós-falta medidos e os calculados pelo algoritmo no terminal da subestação.

Foram realizadas diversas simulações no programa EMTP-ATP para testar o método proposto, variando o tipo e a resistência de falta. Também, foram realizadas análises de sensibilidade ao aplicar erros nos equivalentes, estimativas de cargas e parâmetros dos alimentadores.

Devido a existência de muitos trechos na rede de distribuição, inclusive próximos uns dos outros, a localização de faltas pode apontar mais de um local provável que tenha ocorrido a falta. Desta forma, foi realizado um ranqueamento dos trechos prováveis, tomando como mais provável o trecho com menor erro advindo da minimização da função objetivo. Posteriormente, foi conduzida uma análise estatística, verificando, para cada caso, em qual posição do ranque estava o trecho em que realmente ocorreu a falta. Os resultados mostram que em aproximadamente 70% dos casos simulados, a falta ocorreu até o terceiro trecho ranqueado.

Para aumentar a precisão na localização da falta, dados dos clientes que relatam a falha no fornecimento de energia podem ser utilizados em conjunto com o ranqueamento. Desta forma, nota-se que o método proposto é eficaz e útil na localização de faltas em redes de distribuição com a presença de geração distribuída.

2.7 Artigo 7: Localização de faltas em alimentadores de distribuição utilizando computação distribuída e algoritmo heurístico

Em (DE AGUIAR *et al.*, 2018) foi apresentado um método de localização de faltas em redes de distribuição utilizando computação paralela e otimização heurística. Para determinar as informações da falta (trecho de ocorrência, distância e resistência), o método se baseia nos fasores de tensão e corrente, pré-falta e pós-falta, do terminal da subestação, medidos em regime permanente na Estação Transformadora de Distribuição.

O sistema de distribuição, muitas vezes, é composto por centenas de caminhos e, desta forma, a computação distribuída foi utilizada no método proposto com o intuito de reduzir o tempo de resposta na localização da falta na rede, uma vez que os processos de busca ocorrem de forma paralela. Uma rápida restauração do sistema de distribuição após uma ocorrência de falha é importante tanto para os consumidores como para a concessionária de energia elétrica.

O método proposto tem início com a coleta dos seguintes dados:

- tensão e corrente, pré-falta e pós-falta, medidos no terminal da subestação;
- matriz de admitâncias da rede de distribuição;
- estimativa da impedância das cargas no instante de ocorrência da falta;
- equivalentes da subestação; e
- equivalentes das unidades de geração distribuída.

Em seguida, os sinais de tensão e corrente são filtrados e re-amostrados pelo algoritmo de processamento de sinais.

Posteriormente, a falta é encontrada por meio do algoritmo de localização de faltas, que trabalha com dois processos distintos e relacionados entre si: varredura da rede e análise do trecho.

O processo de varredura da rede consiste no controle da busca pela falta nos trechos da rede. Como foi utilizada computação paralela, o processo de varredura atribui um trecho para cada núcleo de processamento disponível, sendo cada um destes trechos analisados. Em seguida, são atribuídos novos trechos da rede para análise nos núcleos de processamento agora disponíveis. Este processo termina quando todos os trechos da rede forem analisados. Então, o processo de varredura da rede compara os erros advindos da análise de cada trecho, sendo eleito o de menor valor como o trecho de ocorrência da falta. Como o processo de análise do trecho também calcula a distância e resistência, tais informações de localização da falta se tornam também disponíveis.

O processo de análise do trecho da rede consiste em minimizar uma função objetivo que calcula os erros entre os fasores de tensão e corrente pós-falta medidos e os calculados pelo algoritmo, no terminal da subestação. Neste processo é utilizada a função de otimização PS. O processo de minimização da função objetivo utiliza o sistema de equações nodais da rede elétrica, em componentes simétricas, para calcular as correntes e as tensões no terminal, tomando como variáveis a distância e a resistência da falta.

O método proposto foi avaliado por simulações no EMTP-ATP de três redes de distribuição considerando faltas em diversas condições, variando a distância, resistência e tipo. Também foram realizadas análises de sensibilidade frente a desvios nos fasores de tensão e corrente.

Com relação à computação distribuída, foi configurado um cluster por meio de quatro computadores com processador Intel i7, de 3,4GHz, quad-core com 8GB de RAM. Um dos computadores foi o responsável pelo envio e recebimento da informação do trecho a ser analisado. Os demais foram utilizados para o processamento de análise dos trechos, ficando com doze núcleos de processamento disponíveis. O cluster foi configurado pelo Matlab.

O método proposto se mostrou preciso, com resultados aceitáveis para localização de faltas em redes de distribuição. Vale ressaltar, que por utilizar computação distribuída, o método apresentou um bom desempenho em redes de distribuição com centenas de trechos. Uma análise de tempo de processamento foi conduzida e os resultados mostraram uma redução de tempo de processamento de até 8,7 vezes menor em relação ao processamento serial.

2.8 Artigo 8: Aplicação do Método de Simples Reatância e Takagi na Localização de Falta em uma Rede de Média Tensão de um Parque Eólico

Em (PEIXOTO *et al.*, 2020) foi apresentada uma avaliação da aplicação dos métodos de Simples Reatância e Takagi para localizar uma falta real ocorrida em uma rede de média tensão de um parque eólico.

A localização rápida e precisa de faltas em redes de distribuição internas de parques eólicos é importante para garantir o pronto reestabelecimento do sistema, diminuindo o tempo de indisponibilidade do mesmo e custos decorrentes. Para tal, vários métodos de localização de faltas podem ser utilizados, tais como baseados em ondas viajantes, em impedância ou de dois terminais.

No caso dos métodos baseados em impedância, é possível localizar a falta com dados de tensão e corrente, pré-falta e pós-falta, de somente um terminal, ou seja, da subestação coletora. Os principais métodos baseados em impedância são: Simples Reatância, Takagi, Takagi modificado e Sequência Negativa.

Este estudo utilizou os métodos de Simples Reatância e Takagi para localizar uma falta bifásica real ocorrida em um parque eólico de 34,5 kV, pertencente à um completo eólico na Serra de Ibiapaba, Ceará. Tal complexo eólico é composto por cinco parques eólicos, 77 aerogeradores e capacidade instalada de 130 MW.

Desta forma, diante da atuação da proteção de sobrecorrente direcional de um circuito do parque eólico, uma oscilografia com os valores de tensão e corrente, pré-falta e pós-falta, foi registrada pelo relé na ocasião da falta. A partir de tais valores, foi possível calcular os fasores de tensão e corrente e utilizar os métodos de Simples Reatância e Takagi para localizar a falta.

Ao aplicar os métodos de Simples Reatância e Takagi, a falta foi calculada a uma distância de 5407,92 metros da subestação. Observado o diagrama unifilar do parque eólico, este ponto se encontra nas proximidades do aerogerador FOR-10, que se situa a 5426 metros da subestação.

A equipe de operação e manutenção averiguou o local informado e constatou que um objeto, um pedaço de borracha, causou o curto-circuito bifásico.

Portanto, os métodos de Simples Reatância e Takagi foram capazes de localizar a falta de forma satisfatória e precisa na rede de média tensão do parque eólico.

Estado da arte em localização de faltas em linhas compensadas

3

Em sistemas de potência convencionais, grandes usinas de energia geralmente são construídas distantes dos centros de consumo devido aos critérios de planejamento, tais como: disponibilidade de terreno e recursos, questões ambientais, dentre outros. Desta forma, a energia elétrica gerada segue para o centro de consumo por meio de linhas de transmissão, capazes de transportar energia a distâncias significativas aos consumidores atendidos pela concessionária (KUNDUR, 1994).

Com a crescente demanda de energia, o setor energético vem buscando meios de aumentar a capacidade de transmissão de energia elétrica, mantendo a estabilidade, segurança e confiabilidade necessárias. Desta forma, o sistema de transmissão é um elo essencial entre geração e consumo, e qualquer evento que provoque a interrupção do seu funcionamento, pode levar o fornecimento de energia à níveis críticos. Assim, surge a necessidade de métodos eficazes para proteção, reconhecimento, localização, manutenção e tratamento de faltas e eventos que podem ocorrer na rede de energia elétrica.

Com esse enfoque, diversos trabalhos na literatura têm investigado diferentes técnicas para melhorar a capacidade, estabilidade e desempenho do fornecimento de energia elétrica (KILGORE; ELLIOTT; TAYLOR, 1971; RAJARMAN *et al.*, 1998; KOROT; MARKEN; BOCK, 2014; LAKKIREDDY *et al.*, 2015; ORDÓÑEZ; GÓMEZ-EXPÓSITO; MAZA-ORTEGA, 2021).

A capacidade de transmissão de energia está intimamente relacionada à reatância das linhas de transmissão e às tensões entre seus barramentos. No entanto, as características de tensão devem ser mantidas dentro de margens de segurança aceitáveis, ou seja, faixas limitadas. Assim, as técnicas de aprimoramento da transmissão de energia exploram a influência da reatância aparente das linhas.

Dessa forma, o setor elétrico em conjunto com centros de pesquisa vêm desen-

volvendo meios de aumentar a capacidade de transmissão de energia elétrica, sendo um deles a inserção de banco de capacitores em série com a linha de transmissão (KUNDUR, 1994; ZHANG *et al.*, 2017a). A reatância capacitiva conectada em série com a linha de transmissão resulta em uma redução aparente da reatância indutiva, o que aumenta as margens de estabilidade e a capacidade de transferência de energia, considerando-se as magnitudes e ângulos de tensão constantes. Além disso, a compensação capacitiva em série traz benefícios adicionais, como aprimoramento dos perfis de tensão, da estabilidade angular e do amortecimento de oscilações.

O projeto de elementos de compensação série inclui outros elementos conectados em série ou em paralelo com os bancos de capacitores. Em geral, uma chave de curto-circuito é utilizada para auxiliar na conexão da compensação à linha de transmissão, enquanto uma centelha e um MOV atuam como proteção contra flutuações de tensão (ORDÓÑEZ; GÓMEZ-EXPÓSITO; MAZA-ORTEGA, 2021).

Embora a compensação série aprimore a transmissão de energia a longas distâncias e promova o aumento de sua capacidade, a mesma também traz desafios aos algoritmos de localização de faltas. Os elementos de proteção da compensação série induzem um comportamento não linear, indesejável ao sistema. O MOV atua como proteção inicial durante os eventos, permitindo que parte da corrente de falta flua instantaneamente por um caminho de baixa impedância. O resultado é um forte comportamento não linear, uma vez que o banco de capacitores e o MOV conduzem corrente alternadamente, dependendo da proporção da corrente de falta, em cada ciclo da frequência fundamental (BAINS *et al.*, 2018).

Desta forma, a localização precisa da falta nesse tipo de sistema de transmissão é desafiadora e demanda esforços no desenvolvimento de novas metodologias. Em geral, os algoritmos de localização de faltas podem ser essencialmente classificados em: algoritmos baseados em fasores (SAHA *et al.*, 1999; SAHA *et al.*, 2000; YU *et al.*, 2002; IZYKOWSKI *et al.*, 2011; HUSSAIN; OSMAN, 2013; KANG; CHEN; LIAO, 2015; DENG *et al.*, 2016; BAINS; ZADEH, 2016; GAJARE; PRADHAN, 2016; ZHANG *et al.*, 2017a; BAINS *et al.*, 2018; SAFFARIAN; ABASI, 2020; NEMATİ *et al.*, 2021; MANASSERO JR; DI SANTO; ROJAS, 2016; CAI; ZHANG, 2020), algoritmos baseados nos sinais no domínio do tempo (SADEH *et al.*, 2000; SADEH; ADINEHZADEH, 2010; TAHERI; ESLAMI; DAMCHI, 2020; GHAZIZADEH-AHSAEE, 2020) e algoritmos de ondas viajantes (HUANG; CHEN; GONG, 2002; ABEDINI *et al.*, 2013; SAHOO; SAMANTARAY, 2018; NAIDU; PRADHAN, 2020).

Os métodos propostos em (HUSSAIN; OSMAN, 2013; KANG; CHEN; LIAO, 2015; BAINS; ZADEH, 2016; ZHANG *et al.*, 2017b; BAINS *et al.*, 2018; NEMATİ *et al.*, 2021) são baseados em fasores e utilizam duas sub-rotinas para localizar a falta. Estes algoritmos geralmente realizam a compensação série a uma determinada distância dos barramentos, e

não nos terminais das linhas. Assim, as sub-rotinas procuram pela falta em cada trajeto entre os terminais e o compensador série.

Em (HUSSAIN; OSMAN, 2013), cada uma das sub-rotinas estima, simultaneamente, a distância da falta, sendo que apenas uma apresenta resultados aceitáveis. As sub-rotinas utilizam os fasores de tensão e corrente obtidos de ambos os terminais da linha de transmissão. Apesar dos autores mencionarem que os sinais de tensão e corrente podem estar dessincronizados, a correta determinação da distância de falta é dependente da sincronização. Outra desvantagem que limita o uso deste método em casos reais, é que o mesmo só se aplica aos casos nos quais a compensação e o MOV não são curto-circuitados durante a falta.

(KANG; CHEN; LIAO, 2015) propõe uma metodologia iterativa para localização de faltas, sendo necessário o conhecimento prévio do tipo de falta ocorrido e dos dados de pré-falta para realizar a sincronização dos sinais tensão e corrente dos terminais da linha.

Em (BAINS; ZADEH, 2016) é apresentado um método de localização de faltas similar ao de (KANG; CHEN; LIAO, 2015), porém é aplicado somente nos casos nos quais a compensação série for curto-circuitada. Além disso, para ocorrer a convergência da técnica de estimação do fasor, deve haver tempo suficiente para o MOV ser curto-circuitado e posteriormente o dispositivo de proteção atuar. Porém, existem casos reais em que o dispositivo de proteção é ativado antes ou próximo de ocorrer o curto-circuito do banco de capacitores, inviabilizando este método.

O método proposto por (MANASSERO JR; DI SANTO; ROJAS, 2016) localiza faltas em linhas com compensação série minimizando os erros entre as tensões calculadas no ponto da falta. As tensões no ponto da falta são calculadas por um lado em função das tensões e correntes do terminal local e, por outro lado, pelas tensões e correntes do terminal remoto. A principal desvantagem deste método é sua dependência da qualidade da característica do MOV disponível. Além disso, o método não é aplicável aos casos com Compensação Série Controlada por Tiristor (CSCT).

No método proposto em (ZHANG *et al.*, 2017b) a sub-rotina de busca é aplicada inicialmente de um lado da compensação série e, caso encontre uma solução, o algoritmo termina. Caso contrário, a busca continua do outro lado da compensação. Os autores não comentam como a estimação dos fasores é realizada.

Em (BAINS *et al.*, 2018), o método somente é aplicável a faltas que envolvem a terra, o que pode tornar o método inviável em casos reais. Além disso, é considerado que a impedância dos compensadores envolvidos nas fases em falta é igual, o que pode levar a erros quando houver desbalanceamentos entre as fases.

Em (CAI; ZHANG, 2020), os autores apresentam um algoritmo que localiza faltas em linhas de transmissão de circuito duplo com compensação série. Na localização da falta,

o método emprega uma transformação de componentes de seis seqüências. Entretanto, o método considera que a impedância do CS é conhecida e possui o mesmo valor para todas as fases envolvidas na falta, o que pode não ser verdade devido a característica altamente não-linear do MOV.

O método de (NEMATÍ *et al.*, 2021) também utiliza duas sub-rotinas e fasores obtidos a partir das medições dos dois terminais da linha para determinar a localização da falta. No entanto, necessita de conhecimento prévio da impedância da compensação série durante a falta e não se aplica a faltas balanceadas.

O método de (SAFFARIAN; ABASI, 2020) é aplicado a sistemas com linhas de circuitos simples conectadas a três terminais, sendo o sistema dividido em quatro seções para localizar a falta. Em cada uma das seções é realizado o cálculo para cada tipo de falta. Após obter os resultados simultaneamente, o método estima a posição da falta por meio das condições de contorno do sistema.

(GHAZIZADEH-AHSAEE, 2020) apresenta um método que utiliza sinais, no domínio do tempo, de corrente e tensão sincronizados dos dois terminais da linha. Para funcionar adequadamente, o método necessita de uma alta taxa de amostragem dos sinais e, também, é dependente da qualidade dos sinais de tensão e corrente, ou seja, estes devem possuir baixos níveis de ruído.

A metodologia proposta em (TAHERI; ESLAMI; DAMCHI, 2020) utiliza somente sinais de corrente do terminal da linha que contém a compensação série. A localização da falta é realizada em duas etapas, sendo a primeira responsável pela estimação do fasor de corrente e da localização inicial da falta. Na segunda etapa, por meio de cálculos estatísticos, a estimativa da localização da falta é aprimorada. No entanto, o método só é aplicável para faltas fase terra.

Já os algoritmos baseados em ondas viajantes ou no domínio do tempo monitoram os sinais de tensão e corrente que fluem pelos condutores para estimar a localização da falta. Normalmente, apresentam resultados altamente precisos, porém são muito sensíveis a pequenas alterações nos sinais monitorados e necessitam de medições com altas taxas de amostragem, encarecendo o custo de aquisição dos equipamentos para atingir tal confiabilidade.

O método de ondas viajantes proposto por (ABEDINI *et al.*, 2013) utiliza uma transformada wavelet para filtrar os sinais de tensão e corrente medidos próximos à compensação série. Com os sinais resultantes da filtragem são determinadas as ondas viajantes, sendo a primeira onda utilizada para diferenciar o lado da compensação série em que a falta ocorreu e a polaridade da segunda utilizada para calcular a distância de falta.

Os autores de (NAIDU; PRADHAN, 2020), por sua vez, apresentam um método de localização de faltas em linhas com compensação série baseado em ondas viajantes. O

método utiliza os primeiros dois tempos de chegada da onda em cada terminal da linha para estimar o ponto de ocorrência da falta. Entretanto, o método necessita de uma alta taxa de amostragem, na faixa de [MHz], dos sinais de tensão e corrente para que o ponto da falta seja determinado com precisão e, portanto, sua aplicação pode ser inviável junto a maioria dos equipamentos comercialmente disponíveis nas subestações.

Baseado no estado da arte sobre localização de faltas em linhas de transmissão com compensação série, muitas deficiências ainda são encontradas nos métodos existentes:

- utilização de dados de tensão e corrente somente após o curto-circuito da compensação série;
- necessidade de conhecimento prévio das características do MOV e da compensação série;
- inviabilidade de aplicação a qualquer tipo de falta, principalmente quando a curva do MOV não é utilizada;
- limitações relacionadas à posição da compensação série na linha para localização de falta.

Desta forma, a contribuição do presente trabalho é no desenvolvimento de um método de localização de faltas que contorna todas as deficiências listadas acima. Tal método utiliza dados de tensão e corrente adquiridos dos dois terminais da linha de transmissão. Adicionalmente, o método realiza a localização de faltas de qualquer tipo sem a necessidade de conhecimento prévio do modelo da compensação série e da sua posição na linha. Além disso, o método não precisa aguardar o curto-circuito da compensação série para extrair os fasores de tensão e corrente. Tanto quanto é do conhecimento do autor, não existe um método semelhante que trate de forma completa as questões descritas.

Os itens a seguir apresentam, com mais detalhes, os métodos desenvolvidos em (BAINS *et al.*, 2018), (TAHERI; ESLAMI; DAMCHI, 2020), (GHAZIZADEH-AHSAEE, 2020), (MANASSERO JR; DI SANTO; ROJAS, 2016) e (NAIDU; PRADHAN, 2020).

a) Método desenvolvido em (BAINS *et al.*, 2018)

O método proposto em (BAINS *et al.*, 2018) é baseado em fasores e utiliza dados de ambos os terminais da linha de transmissão para localizar faltas. O método é capaz de localizar faltas fase-terra e fase-fase-terra, ou seja, o método não se aplica à faltas que não envolvam a terra, como as trifásicas e bifásicas.

Na técnica proposta, a localização da falta é baseada nas equações da rede em componentes simétricas (positiva, negativa e zero) onde, na equação de cada componente, a impedância da CS da fase em defeito aparece como uma quantidade desconhecida.

Assim, resultando em duas incógnitas em cada equação, ou seja, a distância da falta e a impedância da CS da fase em falta.

Em seguida, utilizando as equações em componentes simétricas, a impedância da CS é eliminada das equações, ou seja, eliminando a necessidade de se conhecer o ponto de operação do MOV. Assim, a distância da falta é, então, determinada.

Uma outra restrição dessa metodologia é o fato de considerar que as impedâncias das Compensações Série (CSs) de cada fase são sempre iguais, ou seja, que os MOVs de cada fase estão sempre no mesmo ponto de operação nos casos das faltas que envolvam mais de uma fase. Esta consideração pode não ser verdadeira, pois pode haver um desbalanceamento entre as correntes de cada fase, medidas nos terminais, envolvidas no curto-circuito.

Desta forma, tomando como base a linha de transmissão ilustrada pela Figura 1, (BAINS *et al.*, 2018) determina a distância da falta por meio de (3.1).

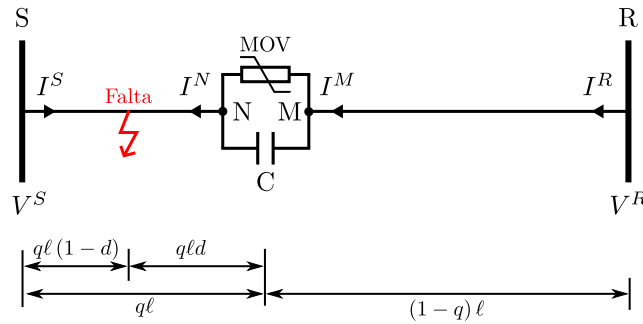


Figura 1 – Linha de transmissão em curto com compensação série. Adaptado de (BAINS *et al.*, 2018).

$$d = \frac{1}{\gamma_i q \ell} \tanh^{-1} \left(\frac{K_i + \Delta \dot{V}_i^{MN}}{J_i} \right) \quad (3.1)$$

Onde,

$$J_i = \dot{V}_i^S \sinh(q\gamma_i \ell) - \bar{Z}_{c_i} \dot{I}_i^S \cosh(q\gamma_i \ell) - \bar{Z}_{c_i} \dot{I}_i^M \quad (3.2)$$

$$K_i = \dot{V}_i^S \cosh(q\gamma_i \ell) - \bar{Z}_{c_i} \dot{I}_i^S \sinh(q\gamma_i \ell) - \dot{V}_i^M \quad (3.3)$$

$$\dot{V}_i^M = \dot{V}_i^R \cosh[(1-q)\gamma_i \ell] - \bar{Z}_{c_i} \dot{I}_i^R \sinh[(1-q)\gamma_i \ell] \quad (3.4)$$

$$\dot{I}_i^M = \dot{I}_i^R \cosh[(1-q)\gamma_i \ell] - \frac{\dot{V}_i^R}{\bar{Z}_{c_i}} \sinh[(1-q)\gamma_i \ell] \quad (3.5)$$

Onde, ainda,

- i é o índice de referência às sequências zero (0), positiva (1) e negativa (2);
- \dot{V}_i^S é a tensão de sequência i no terminal S;
- \dot{I}_i^S é a corrente de sequência i no terminal S;
- \dot{V}_i^R é a tensão de sequência i no terminal R;
- \dot{I}_i^R é a corrente de sequência i no terminal R;
- \dot{V}_i^M é a tensão de sequência i no terminal M;
- \dot{I}_i^M é a corrente de sequência i no terminal M;
- $\Delta\dot{V}_i^{MN}$ é a queda de tensão no CS;
- \bar{Z}_{c_i} é a impedância característica de sequência i da linha de transmissão;
- γ_i é a constante de propagação de sequência i da linha de transmissão;
- ℓ é o comprimento total da linha;
- d é a distância da falta em relação ao terminal S;
- q é a posição relativa da CS.

Reescrevendo (3.1), tem-se que:

$$J_i \tanh(\gamma_i q \ell d) - K_i - \Delta\dot{V}_i^{MN} = 0 \quad (3.6)$$

Somando-se cada termo de (3.6), para todas as componentes simétricas, e multiplicando por a_i , obtêm-se:

$$\sum_{i=0}^2 a_i J_i \tanh(\gamma_i q \ell d) - \sum_{i=0}^2 a_i K_i - \sum_{i=0}^2 a_i \Delta\dot{V}_i^{MN} = 0 \quad (3.7)$$

onde, a_i é um coeficiente para a $i^{\text{ésima}}$ componente simétrica que depende do tipo de falta ocorrido.

Observando-se (3.7), nota-se que o termo \dot{V}_i^{MN} é desconhecido, assim como a distância de falta d . No entanto, o termo $\sum_{i=0}^2 a_i \Delta\dot{V}_i^{MN}$ pode ser estimado conforme o tipo de falta e os valores de a_i .

Dessa forma, considerando a ocorrência de uma falta fase-terra, as equações para a queda de tensão na CS, em componentes simétricas, pode ser escrita como:

$$\Delta\dot{V}_0^{MN} = \frac{1}{3} \left[\bar{Z}' \left(\dot{I}_0^M + \dot{I}_1^M + \dot{I}_2^M \right) - jX_C \left(2\dot{I}_0^M - \dot{I}_1^M - \dot{I}_2^M \right) \right] \quad (3.8)$$

$$\Delta\dot{V}_1^{MN} = \frac{1}{3} \left[\bar{Z}' \left(\dot{I}_0^M + \dot{I}_1^M + \dot{I}_2^M \right) - jX_C \left(2\dot{I}_1^M - \dot{I}_2^M - \dot{I}_0^M \right) \right] \quad (3.9)$$

$$\Delta \dot{V}_2^{MN} = \frac{1}{3} \left[\bar{Z}' \left(\dot{I}_0^M + \dot{I}_1^M + \dot{I}_2^M \right) - jX_C \left(2\dot{I}_2^M - \dot{I}_0^M - \dot{I}_1^M \right) \right] \quad (3.10)$$

onde, $-jX_C$ é a impedância do CS da(s) fase(s) sã(s) e \bar{Z}' é a impedância do CS da(s) fase(s) em curto-circuito, a qual é uma quantidade desconhecida.

Assim, subtraindo-se (3.9) de (3.8), tem-se que:

$$\Delta \dot{V}_0^{MN} - \Delta \dot{V}_1^{MN} = -jX_C \left(\dot{I}_0^M - \dot{I}_1^M \right) \quad (3.11)$$

E, de (3.11) é possível notar que a impedância desconhecida da fase do CS em curto-circuito é eliminada e o termo $\sum_{i=0}^2 a_i \Delta \dot{V}_i^{MN}$ em (3.7) pode, então, ser estimado. Nota-se, ainda, que os coeficientes a_i para faltas fase-terra são $a_0 = 1$, $a_1 = -1$ e $a_2 = 0$.

Finalmente, após a substituição de (3.11) em (3.7), esta última passa a conter como variável desconhecida apenas a distância da falta. Então, empregando-se um método de solução numérico de equações não-lineares, como por exemplo, o método de Newton-Raphson, o valor da distância de falta, d , pode ser obtido.

No caso de faltas dupla-fase-terra, o procedimento de cálculo é similar para o caso de faltas fase-terra, porém o valor dos coeficientes a_i são diferentes, portando os valores $a_0 = 1$, $a_1 = 1$ e $a_2 = 1$.

Nos casos de faltas dupla-fase o processo de obtenção dos coeficientes a_i é similar ao utilizado para as faltas dupla-fase-terra. No entanto, o termo $\sum_{i=0}^2 a_i J_i \tanh(\gamma_i q \ell d)$, que contém como incógnita a distância de falta, d , desaparece. Isso ocorre, uma vez que tanto a impedância característica como a constante de propagação da linha de sequência positiva e negativa são idênticas.

Nos casos de faltas trifásicas, o termo $\sum_{i=0}^2 a_i \Delta \dot{V}_i^{MN}$ passa a contar com apenas uma equação, sendo impossível extrair a impedância do CS cujo valor é desconhecido e, assim, a distância de falta não pode ser determinada utilizando (3.7).

b) Método desenvolvido em (TAHERI; ESLAMI; DAMCHI, 2020)

O método desenvolvido por (TAHERI; ESLAMI; DAMCHI, 2020) é baseado em sinais no domínio do tempo e utiliza dados (fasores de tensão e corrente) de um terminal da linha de transmissão com CS para determinar a distância de ocorrência da falta.

Como no método de (BAINS *et al.*, 2018), o método é baseado em componentes simétricas. Porém, no método proposto, a impedância da CS não é eliminada das equações, utilizando, dessa forma, a modelagem da CS proposta em (GOLDSWORTHY, 1987). Além disso, o método é capaz de localizar apenas faltas fase-terra, tornando o método limitado e, provavelmente, pouco atrativo para as concessionárias de transmissão.

Assim, tomando como base o sistema de transmissão ilustrado pela Figura 2, o método proposto por (TAHERI; ESLAMI; DAMCHI, 2020) localiza a falta por meio da solução numérica de (3.12), onde a única incógnita é a distância da falta d .

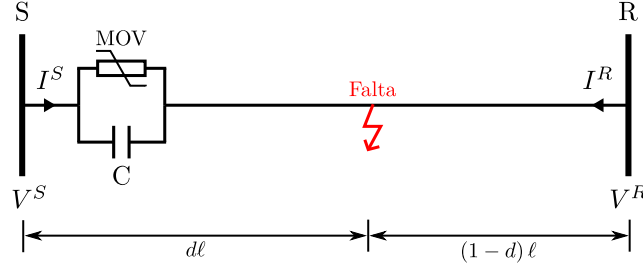


Figura 2 – Linha de transmissão em curto com compensação série. Adaptado de (TAHERI; ESLAMI; DAMCHI, 2020).

$$\begin{aligned}
 & \left(\frac{\bar{Z}_{S0} + \frac{1}{3}(\bar{Z}' - 2jX_C) + \bar{Z}_{10} + \bar{Z}_{R0}}{\bar{Z}_{R0} + (1-q)\bar{Z}_{10}} - \frac{\frac{1}{3}(\bar{Z}' + jX_C)}{\bar{Z}_{R2} + (1-q)\bar{Z}_{12}} \right) \dot{i}_0^S \\
 & + \left(\frac{\frac{1}{3}(\bar{Z}' + jX_C)}{\bar{Z}_{R0} + (1-q)\bar{Z}_{10}} - \frac{\frac{1}{3}(\bar{Z}' + jX_C)}{\bar{Z}_{R2} + (1-q)\bar{Z}_{12}} \right) \dot{i}_1^S \\
 & + \left(\frac{\frac{1}{3}(\bar{Z}' + jX_C)}{\bar{Z}_{R0} + (1-q)\bar{Z}_{10}} - \frac{\bar{Z}_{S2} + \frac{1}{3}(\bar{Z}' - 2jX_C) + \bar{Z}_{12} + \bar{Z}_{R2}}{\bar{Z}_{R2} + (1-q)\bar{Z}_{12}} \right) \dot{i}_2^S = 0
 \end{aligned} \tag{3.12}$$

onde,

- \bar{Z}_{S0} , \bar{Z}_{S1} e \bar{Z}_{S2} são, respectivamente, as impedâncias de sequência zero, positiva e negativa do equivalente do terminal S;
- \bar{Z}_{R0} , \bar{Z}_{R1} e \bar{Z}_{R2} são, respectivamente, as impedâncias de sequência zero, positiva e negativa do equivalente do terminal R;
- \bar{Z}_{10} , \bar{Z}_{11} e \bar{Z}_{12} são, respectivamente, as impedâncias de sequência zero, positiva e negativa da linha de transmissão;
- \bar{Z}' , é a impedância da fase em curto-circuito da CS.

Ainda, (TAHERI; ESLAMI; DAMCHI, 2020) resolvem 3.12 para todos os dados de tensão e corrente disponíveis após o instante de falta, no caso definiram ter disponíveis quatro ciclos de 60 [Hz], ou de forma genérica $N_w + N - 1$ amostras. Além disso, os autores definiram uma janela de dados de N amostras que percorre todos os $N_w + N - 1$ dados disponíveis, obtendo ao final da execução do algoritmo N_w valores para a distância da falta.

Em seguida, os autores realizam uma análise estatística sobre os N_w valores de faltas para definir a distância com a maior probabilidade de ser a correta e tomam o valor médio resultante como a distância da falta. A Figura 3 mostra um resumo de execução do método.

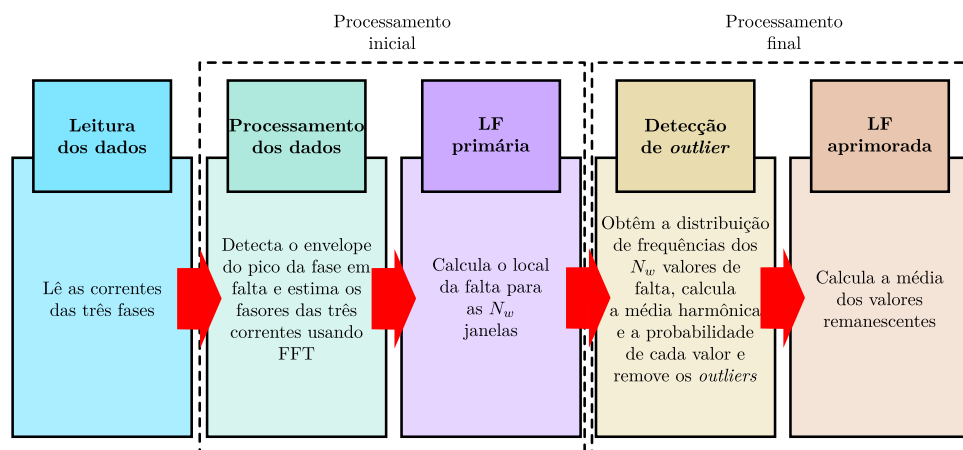


Figura 3 – Diagrama dos passos de execução do método. Adaptado de (TAHERI; ESLAMI; DAMCHI, 2020).

c) Método desenvolvido em (GHAZIZADEH-AHSAEE, 2020)

O método proposto por (GHAZIZADEH-AHSAEE, 2020) utiliza dados de ambos os terminais da linha de transmissão e a localização da falta é realizada no domínio do tempo, onde a distância de ocorrência da falta e o tipo são determinados por meio da minimização de uma função objetivo que minimiza o erro quadrático entre os resultados obtidos por cada amostra.

Como o método é baseado no domínio do tempo, utilizando as equações de propagação das ondas de tensão e corrente na linha de transmissão, ele necessita de altas taxas de amostragem destes sinais, que são medidos em ambos os terminais da linha, para que erros razoáveis de localização sejam alcançados. Este fator pode ser um limitante quanto aos equipamentos a serem empregados pelas concessionárias de transmissão, pois envolvem custos mais elevados em relação aos equipamentos comumente empregados para proteção e controle.

Tomando o circuito ilustrado pela Figura 4 como referência e considerando a ocorrência de uma falta trifásica no trecho S-E, primeiramente as tensões e correntes, em componentes de fase, são transformadas em componentes modais (0, 1 e 2). Em seguida, a corrente no nó B é calculada de duas formas, uma como função das tensões e correntes do terminal S e outra em função das tensões e correntes do terminal R e, então, a diferença entre elas é minimizada.

A corrente entrando no terminal B em função das tensões e correntes modais do

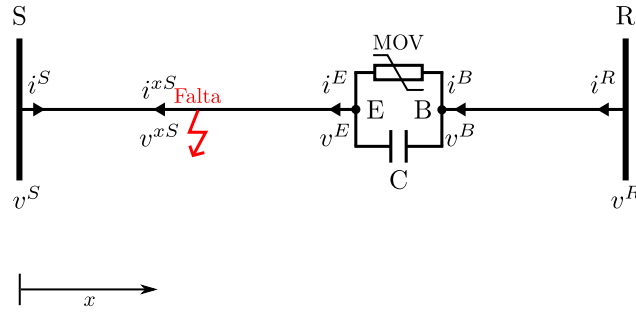


Figura 4 – Linha de transmissão em curto com compensação série. Adaptado de (GHAZIZADEH-AHSAEE, 2020).

lado esquerdo do ponto da falta é:

$$\begin{aligned}
 i_n^B(t) = & \left\{ R_n^{Ec} \left[\left(1 + \frac{R_n^{Ec}}{R_f} \right) v_n^{xS}(t') + R_n^{Ec} i_n^{xS}(t') \right] \right. \\
 & - R_n^{Ec} \left[\left(1 - \frac{R_n^{Ec}}{R_f} \right) v_n^{xS}(t'') + R_n^{Ec} i_n^{xS}(t'') \right] \\
 & \left. - \left(\frac{R_n^E}{4} \right) \left[\left(2 + \frac{R_n^E}{2R_f} \right) v_n^{xS}(t) + \frac{R_n^E}{2} i_n^{xS}(t) \right] \right\} / 2Z_{cn}^2
 \end{aligned} \quad (3.13)$$

onde,

- n é a componente modal (0, 1 e 2);
- Z_{cn} é a impedância característica da linha no modo n ;
- $t' = t + T_n^S - \tau_n$, com T_n^S sendo o tempo necessário para a onda viajar de S para E e τ_n o tempo para viajar de S até o ponto de falta;
- $t'' = t - T_n^S + \tau_n$;
- t é o tempo;
- R_n^E é a resistência do trecho entre E e a falta;
- $R_n^{Ec} = Z_{cn} + R_n^E/4$;
- $R_n^{Ec} = Z_{cn} - R_n^E/4$;
- R_f é a resistência de falta;
- v_n^{xS} e i_n^{xS} são, respectivamente, a tensão e a corrente modal do lado esquerdo da falta.

Porém, é desejada a corrente entrando no nó B a partir das tensões e correntes modais do terminal S. Desta forma, a tensão v_n^{xS} e a corrente i_n^{xS} em (3.13) devem ser

substituídas por expressões que envolvam a tensão e corrente do terminal S. Sendo assim, (3.14) e (3.15) satisfazem esta condição.

$$v_n^{xS}(t) = \left\{ \begin{aligned} & \left(R_n'^{Sc} \right)^2 \left[v_n^S(t + \tau_n) - R_n'^{Sc} i_n^S(t + \tau_n) \right] \\ & + \left(R_n''^{Sc} \right)^2 \left[v_n^S(t + \tau_n) + R_n''^{Sc} i_n^S(t - \tau_n) \right] \\ & - \left(\frac{R_n'^{Sc} R_n'^S}{4} \right) \left[\frac{R_n'^S}{2R_n'^{Sc}} v_n^S(t) + 2R_n''^{Sc} i_n^S(t) \right] \end{aligned} \right\} / 2Z_{cn}^2 \quad (3.14)$$

$$i_n^{xS}(t) = \left\{ \begin{aligned} & R_n'^{Sc} \left[v_n^S(t + \tau_n) - R_n'^{Sc} i_n^S(t + \tau_n) \right] \\ & - R_n''^{Sc} \left[v_n^S(t - \tau_n) + R_n''^{Sc} i_n^S(t - \tau_n) \right] \\ & - \left(\frac{R_n'^S}{4} \right) \left[2v_n^S(t) - \frac{R_n'^S}{2} i_n^S(t) \right] \end{aligned} \right\} / 2Z_{cn}^2 \quad (3.15)$$

onde,

- $R_n'^S$ é a resistência do trecho entre S e a falta;
- $R_n'^{Sc} = Z_{cn} + R_n'^S/4$;
- $R_n''^{Sc} = Z_{cn} - R_n'^S/4$;
- v_n^S e i_n^S são, respectivamente, a tensão e a corrente modal no terminal S.

Assim, após a substituição de (3.14) e (3.15) em (3.13), a corrente $i_n^B(t)$ pode ser escrita como função de t , τ_n e R_f , conforme (3.16).

$$i_n^B(t) = f_n(t, \tau_n, R_f) \quad (3.16)$$

Ainda, (3.16) pode ser reescrita como:

$$F_{1n}^{SE} = i_n^B(t) - f_n(t, \tau_n, R_f) = 0 \quad (3.17)$$

Por outro lado, a corrente no terminal B pode ser escrita em função dos sinais de tensão e corrente modais do terminal R, assim:

$$i_n^B(t) = \left\{ \begin{aligned} & R_n'^{Rc} \left[v_n^R(t + T_n^R) - R_n'^{Rc} i_n^R(t + T_n^R) \right] \\ & - R_n''^{Rc} \left[v_n^R(t - T_n^R) + R_n''^{Rc} i_n^R(t - T_n^R) \right] \\ & - \frac{R_n'^R}{4} \left[2v_n^R(t) - \frac{R_n'^R}{2} i_n^R(t) \right] \end{aligned} \right\} / 2Z_{cn}^2 \quad (3.18)$$

onde,

- T_n^S é o tempo necessário para a onda viajar de R para B
- R_n^R é a resistência do trecho entre R e B;
- $R_n^{Rc} = Z_{cn} + R_n^R/4$;
- $R_n'^{Rc} = Z_{cn} - R_n^R/4$;
- v_n^R e i_n^R são, respectivamente, a tensão e a corrente modal no terminal R.

Ainda, τ_n pode ser escrita em função da distância da falta x , conforme (3.19).

$$\tau_n = \frac{x}{\nu_n} \quad (3.19)$$

onde, ν_n é a velocidade da onda para o modo n .

Por fim, substituindo (3.18) e (3.19) em (3.17) e discretizando, obtêm-se:

$$F_n^{SE}(h, x, R_f) = 0 \quad (3.20)$$

onde,

- h é o número da amostra de tensão e corrente, com $h\Delta t = t$;
- Δt é o passo de amostragem.

Para faltas no trecho B-R é possível obter uma equação similar à (3.20), assim:

$$F_n^{BR}(h, x, R_f) = 0 \quad (3.21)$$

Desta forma, entre (3.20) e (3.21), a única que irá satisfazer a condição de ser nula será aquela cujo trecho contém a falta. Assim, é possível escrever a seguinte equação:

$$f_n(h, x, R_f) = \begin{cases} F_n^{SE} & \text{para } 0 < x < X^{SE} \\ F_n^{BR} & \text{para } X^{SE} < x < X^{BR} \end{cases} \quad (3.22)$$

onde, X^{SE} é a posição máxima da falta no trecho S-E e X^{BR} é a posição máxima da falta no trecho B-R. Vale ressaltar que as equações não são válidas para faltas exatamente no terminal da CS, ou seja, no ponto X^{SE} .

Além disso, com base em (3.22) se define (3.23), que realiza o somatório dos valores absolutos de (3.22) para todos os modos de propagação. Assim:

$$F = \sum_{n=0}^2 |f_n(h, x, R_f)| \quad (3.23)$$

Seguindo um procedimento similar ao realizado para faltas trifásicas, é obter as formulações para os demais tipos de falta (fase-terra, fase-fase-terra e fase-fase).

Finalmente, (3.23) é utilizada em um processo de otimização para localizar o ponto da falta. O processo de otimização é baseado no método dos mínimos quadrados e resolve o seguinte problema, onde um processo de minimização é realizado para cada tipo de falta e o de menor valor para (3.24) é escolhido como o resultado correto.

$$\begin{aligned} \text{Min}J(x, R_f, TF) &= \sum_{h=1}^N F^2(h, x, R_f, TF) \\ \text{Sujeito a: } &\left\{ \begin{array}{l} 0 < x < X^{SR} \\ x \neq X^{SE} \\ R_f \geq 0 \\ TF \in \{\text{Todos os tipos de falta}\} \end{array} \right. \end{aligned} \quad (3.24)$$

onde, N é o número de amostras dentro da janela de dados.

d) Método desenvolvido em (MANASSERO JR; DI SANTO; ROJAS, 2016)

O método proposto em (MANASSERO JR; DI SANTO; ROJAS, 2016) é baseado em fasores em componentes de fase e localiza faltas em linhas de transmissão de circuito simples ou duplo, com a presença de compensação série. A compensação pode estar localizada tanto em ambos os terminais da linha de transmissão, quanto no meio da mesma. Tal método é baseado em otimização heurística e utiliza medições de tensão e corrente nos dois terminais da linha para calcular as tensões no local exato da falta, determinando a distância da mesma.

Nesse método, os fasores de tensão e corrente, pós-falta, são estimados no ponto da falta de um lado pelos fasores de tensão e corrente do terminal local e, por outro lado, pelos fasores de tensão e corrente do terminal remoto, obtendo-se, desta forma, um par de tensão e outro de corrente no ponto da falta.

A soma das correntes, calculadas por ambos os lados, no ponto da falta fornecem a corrente de falta. Porém, a corrente de falta é previamente desconhecida e, portanto, não é utilizada pelo método. No entanto, as tensões calculadas por ambos os lados no ponto da falta devem ser idênticas no ponto exato da falta e, portanto, a diferença entre elas deve ser nula. Esta diferença é, então, minimizada pelo método, tendo como variável a distância da falta em relação ao terminal local.

Os fasores de tensão e corrente no local da falta são calculados utilizando o modelo da linha de transmissão e a medição de tensão e corrente do terminal correspondente, descontada a queda de tensão ocorrida na compensação série. Desta forma, o método tem como desvantagem a necessidade de depender da precisão da curva do MOV levantada a partir dos dados fornecidos pelo fabricante. Além disso, o método

necessita utilizar técnicas de *vector fitting* para obter curvas para a resistência e a reatância capacitiva da CS em função da corrente que o atravessa, trazendo ainda mais incertezas ao procedimento de cálculo utilizado pelo método.

Assim, para melhor compreensão do método proposto por (MANASSERO JR; DI SANTO; ROJAS, 2016), considere o sistema de transmissão ilustrado pela Figura 5.

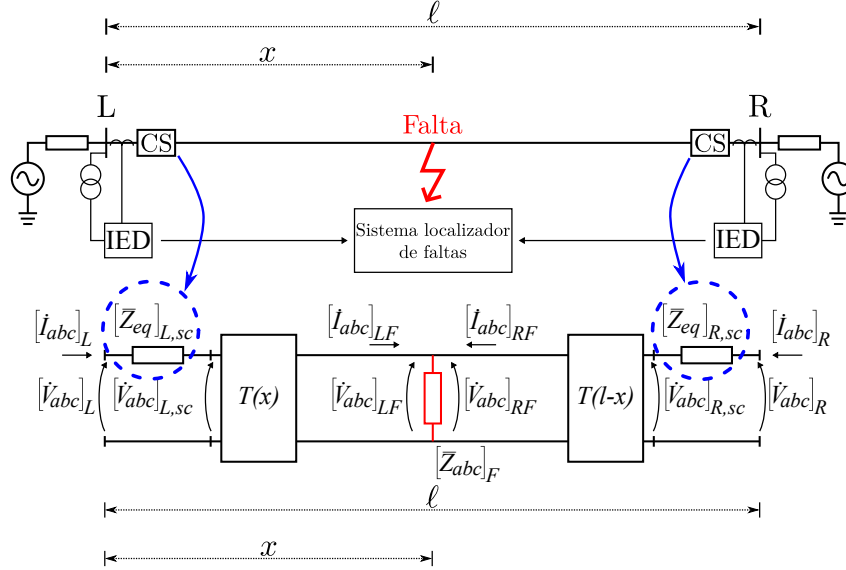


Figura 5 – Linha de transmissão em curto com compensação série. Adaptado de (MANASSERO JR; DI SANTO; ROJAS, 2016).

Dispositivos eletrônicos inteligentes instalados nos terminais local (L) e remoto (R) são responsáveis por registrar os sinais de tensão e corrente, com ou sem sincronização de tempo, que são disponibilizados para o sistema de localização de faltas.

Com esses fasores, estimam-se as tensões e correntes no ponto da falta a partir de ambos os terminais, L e R. Assim:

$$\begin{bmatrix} [\dot{V}_{abc}]_{LF} \\ [\dot{I}_{abc}]_{LF} \end{bmatrix} = [T(x)] \begin{bmatrix} [\dot{V}_{abc}]_{L,sc} \\ [\dot{I}_{abc}]_L \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

$$\begin{bmatrix} [\dot{V}_{abc}]_{RF} \\ [\dot{I}_{abc}]_{RF} \end{bmatrix} = [T(\ell - x)] \begin{bmatrix} [\dot{V}_{abc}]_{R,sc} \\ [\dot{I}_{abc}]_R \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

em que

$$[T(x)] = \begin{bmatrix} [A(x)] & -[B(x)] \\ -[C(x)] & [D(x)] \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

$$[T(\ell - x)] = \begin{bmatrix} [A(\ell - x)] & -[B(\ell - x)] \\ -[C(\ell - x)] & [D(\ell - x)] \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

e

$$\begin{aligned} [\dot{V}_{abc}]_{L,sc} &= [\dot{V}_{abc}]_L - [\bar{Z}_{eq}]_{L,sc} \times [\dot{I}_{abc}]_L \\ [\dot{V}_{abc}]_{R,sc} &= [\dot{V}_{abc}]_R - [\bar{Z}_{eq}]_{R,sc} \times [\dot{I}_{abc}]_R \end{aligned} \quad (3.29)$$

onde,

- $[\bar{Z}_{eq}]_{L,sc}$ e $[\bar{Z}_{eq}]_{R,sc}$ são as impedâncias equivalentes das CSs instaladas nos terminais L e R, respectivamente;
- $[\dot{V}_{abc}]_L$ e $[\dot{V}_{abc}]_R$ são as tensões nos terminais L e R, respectivamente;
- $[\dot{I}_{abc}]_L$ e $[\dot{I}_{abc}]_R$ são as correntes nos terminais L e R, respectivamente.
- $ABCD$ são as matrizes dos parâmetros do quadripolo da linha de transmissão.

Para a estimar a distância de falta é necessário realizar uma comparação entre as tensões pós-falta, calculadas a partir de ambos os terminais, L (3.25) e R (3.26), no ponto da falta. Desta forma:

$$\begin{aligned} [\Delta \dot{V}_{abc}]_F &= [A_{(x)}] \times [\dot{V}_{abc}]_{L,sc} - [B_{(x)}] \times [\dot{I}_{abc}]_L - \\ &\quad [A_{(l-x)}] \times [\dot{V}_{abc}]_{R,sc} + [B_{(l-x)}] \times [\dot{I}_{abc}]_R \end{aligned} \quad (3.30)$$

As diferenças entre as tensões descritas em (3.30) devem ser, idealmente, iguais a zero no ponto de ocorrência da falta. Desta forma, o método proposto utiliza a ferramenta de otimização Pattern Search para encontrar a distância de falta que minimiza (3.30). Vale ressaltar que tal diferença não depende das resistências de falta nem das impedâncias das fontes, mas sim do tipo de falta. Considerando as faltas fase-terra, é possível reescrever (3.30) como:

$$\Delta V_{p,F} = |\dot{V}_{p,LF} - \dot{V}_{p,RF}| \quad (3.31)$$

onde o subscrito p se refere a an , bn ou cn .

Considerando as faltas fase-fase e fase-fase-terra, é possível reescrever (3.30) como:

$$\Delta V_{p_1 p_2, F} = |\dot{V}_{p_1, LF} - \dot{V}_{p_2, LF} - \dot{V}_{p_1, RF} + \dot{V}_{p_2, RF}| \quad (3.32)$$

onde o subscrito p_1 se refere a a , b ou c e o subscrito p_2 se refere a b , c ou a , respectivamente.

Finalmente, considerando faltas trifásicas, é possível reescrever (3.30) como:

$$\Delta V_{abc,F} = \frac{1}{3} \cdot \left| \dot{V}_{an,LF} + \alpha \cdot \dot{V}_{bn,LF} + \alpha^2 \cdot \dot{V}_{cn,LF} - \dot{V}_{an,RF} - \alpha \cdot \dot{V}_{bn,RF} - \alpha^2 \cdot \dot{V}_{cn,RF} \right| \quad (3.33)$$

onde $\alpha = 1 \angle 120^\circ$.

Para casos onde a CS é instalada ao longo da linha de transmissão, um procedimento similar é empregado. Porém, nestes casos, o método divide a linha em dois trechos, um antes da CS e outro após. Assim, uma equação similar à (3.30) é escrita para cada trecho e, então, são minimizadas por um processo de otimização. O trecho contendo o menor erro de minimização é o escolhido como contendo a falta.

Já no caso das linhas de transmissão com circuito duplo e compensação série em ambos os terminais ou no meio da linha, o procedimento é similar aos casos de linhas com circuito simples, porém é considerado o acoplamento magnético entre os seis condutores da linha de transmissão.

e) Método desenvolvido em (NAIDU; PRADHAN, 2020)

O método de localização de faltas em linhas com compensação série proposto por (NAIDU; PRADHAN, 2020) é baseado em ondas viajantes e utiliza medições de correntes sincronizadas de ambos os terminais da linha de transmissão para localizar a falta.

O método utiliza duas sub-rotinas de localização de faltas, uma assumindo que a falta está no lado esquerdo da CS e a outra do lado direito. Ainda, para um caso de falta, dois valores de distância de falta são calculados, correspondentes aos dois primeiros tempos de chegada da onda medidas em ambos os terminais. Em seguida, a distância de falta correta é selecionada entre as duas utilizando as informações de identificação das sub-rotinas que analisam cada trecho da linha. O trecho com defeito é determinado pela comparação de dois índices calculados usando os tempos de chegada da onda, registrados em ambos os terminais. O primeiro índice é obtido tomando a diferença entre o segundo tempo de chegada registrado no terminal remoto e o primeiro tempo de chegada registrado no terminal local da linha. O segundo índice é calculado tomando a diferença entre o segundo tempo de chegada registrado no terminal local e o primeiro tempo de chegada medido no terminal remoto da linha.

Para melhor compreensão do método proposto por (NAIDU; PRADHAN, 2020), considere a linha de transmissão ilustrada pela Figura 6.

Considerando que a falta ocorreu no trecho esquerdo, conforme mostra a Figura 6, o tempo para a onda de corrente, partindo do ponto da falta, alcançar o terminal A é

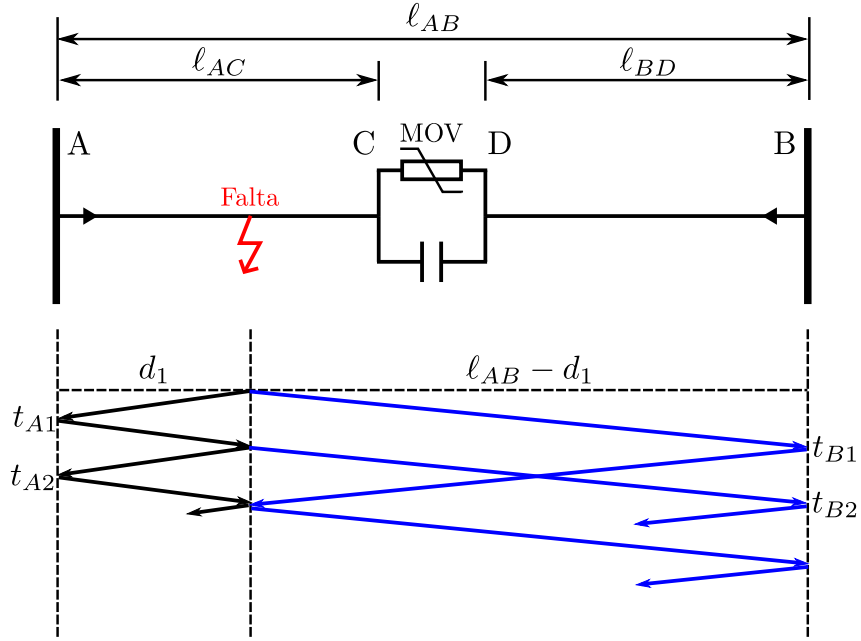


Figura 6 – Linha de transmissão em curto com compensação série. Adaptado de (NAIDU; PRADHAN, 2020).

dado por:

$$t_{A1} = t_{0A} + \frac{d_1}{\nu} \quad (3.34)$$

Ainda, a segunda chegada, a partir da reflexão da onda no ponto da falta, é dada por:

$$t_{A2} = t_{0A} + \frac{3d_1}{\nu} \quad (3.35)$$

E, para o terminal B, os dois primeiros tempos de chegada são:

$$t_{B1} = t_{0B} + \frac{\ell_{AB} - d_1}{\nu} \quad (3.36)$$

$$t_{B2} = t_{0B} + \frac{\ell_{AB} + d_1}{\nu} \quad (3.37)$$

Assim, por meio de (3.34) a (3.37), a distância do ponto de ocorrência da falta no trecho esquerdo, em relação ao terminal A, pode ser determinada conforme (3.38). Cabe mencionar, que nos primeiros instantes (primeiros milissegundos) de ocorrência da falta o valor da capacitância da CS permanece inalterada e, portanto, não há reflexões e refrações nos terminais C e D.

$$d_1 = [(t_{A2} - t_{A1}) + (t_{B2} - t_{B1})] \frac{\ell_{AB}}{4(t_{B2} - t_{A1})} \quad (3.38)$$

onde,

- t_{0A} e t_{0B} são os instantes de ocorrência da falta registrados nos terminais A e B, respectivamente;
- d_1 é a distância da falta ocorrida no trecho esquerdo da linha;
- ℓ_{AB} é o comprimento total da linha.
- ν é a velocidade de propagação da onda de corrente.

De forma análoga, considerando que a falta ocorreu no lado direito do trecho da linha de transmissão, os tempos de chegada da onda nos terminais são calculados como:

$$t_{A1} = t_{0A} + \frac{d_2}{\nu} \quad (3.39)$$

$$t_{A2} = t_{0A} + \frac{2\ell_{AB} - d_2}{\nu} \quad (3.40)$$

$$t_{B1} = t_{0B} + \frac{\ell_{AB} - d_2}{\nu} \quad (3.41)$$

$$t_{B2} = t_{0B} + \frac{3(\ell_{AB} - d_2)}{\nu} \quad (3.42)$$

Assim, por meio de (3.39) a (3.42), a distância do ponto de ocorrência da falta no trecho direito, em relação ao terminal A, pode ser determinada conforme (3.43).

$$d_2 = \ell_{AB} - [(t_{A2} - t_{A1}) + (t_{B2} - t_{B1})] \frac{\ell_{AB}}{4(t_{A2} - t_{B1})} \quad (3.43)$$

Uma vez obtidos os dois resultados possíveis para o ponto de ocorrência da falta, sendo que não se conhece a priori em que trecho a falta ocorreu, os autores de (NAIDU; PRADHAN, 2020) desenvolveram uma lógica de escolha, conforme descrita a seguir.

- **Caso 1:** considerando que a falta ocorreu no trecho esquerdo da linha. A partir de (3.34) a (3.37), podem ser obtidos dois índices de avaliação:

$$Id_{11} = t_{B2} - t_{A1} = \ell_{AB}/\nu \quad (3.44)$$

$$Id_{21} = t_{A2} - t_{B1} = (4d_1 - \ell_{AB})/\nu \quad (3.45)$$

Analisando-se (3.44) e (3.45), o índice Id_{11} é sempre maior que o índice Id_{12} nos casos de falta no trecho esquerdo da linha.

- **Caso 2:** considerando que a falta ocorreu no trecho direito da linha. A partir de (3.39) a (3.42), como no Caso 1, podem ser obtidos dois índices de avaliação:

$$Id_{12} = t_{B2} - t_{A1} = (3\ell_{AB} - 4d_2) / \nu \quad (3.46)$$

$$Id_{22} = t_{A2} - t_{B1} = \ell_{AB} / \nu \quad (3.47)$$

Analisando-se (3.46) e (3.47), o índice Id_{12} é sempre menor que o índice Id_{22} nos casos de falta no trecho direito da linha.

- **Caso especial:** caso a falta ocorra no meio da linha a diferença absoluta entre os tempos $t_{B2} - t_{A1}$ e $t_{A2} - t_{B1}$, idealmente, é igual à zero. No entanto, como há um erro no registro dos tempos de chegada das ondas inerente à frequência de amostragem dos sinais, a diferença entre os tempos é comparada à um valor limiar, definido com base na frequência de amostragem. No caso deste trabalho, os autores utilizaram um limiar de 2 $[\mu s]$, equivalente à frequência de amostragem empregada de 1 [MHz].

Por fim, após a comparação entre os índices, o ponto de ocorrência da falta é determinado.

Compensação série

4

As grandes usinas de energia elétrica são instaladas em locais cujos recursos energéticos são abundantes e, comumente, tais locais ficam afastados dos centros consumidores. Desta forma, torna-se necessário o transporte de grandes blocos de energia por longas distâncias, exigindo a construção de sistemas de transmissão eficientes e confiáveis. No entanto, a transmissão de energia, em corrente alternada, está associada a limitações físicas e margens de estabilidade que desafiam a ampliação da capacidade de transmissão.

Uma forma de ampliar a capacidade de transferência de potência, bem como a margem de estabilidade, do sistema de transmissão é a compensação da reatância indutiva da linha de transmissão.

Como exemplo, tomando o circuito mostrado pela Figura 7 e assumindo que as tensões das barras e seus ângulos oscilam dentro de margens estreitas e confiáveis durante a operação da rede elétrica, a potência transmitida entre duas barras da rede é inversamente proporcional à impedância entre elas, conforme mostra, simplificada, (4.1). Assim, uma impedância capacitiva é comumente empregada para melhorar as margens da capacidade de transmissão, que apresenta uma reatância negativa em relação à indutância da linha, diminuindo a impedância total, conforme mostra a Figura 8. A esta técnica se dá o nome de CS (ORDÓÑEZ; GÓMEZ-EXPÓSITO; MAZA-ORTEGA, 2021).

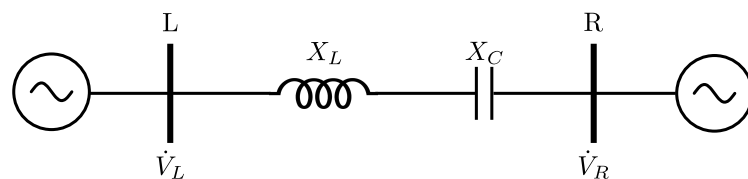


Figura 7 – Sistema de transmissão com compensação.

$$P_{LR} = \frac{|\dot{V}_L| |\dot{V}_R|}{X_L - X_C} \text{sen} \delta \quad (4.1)$$

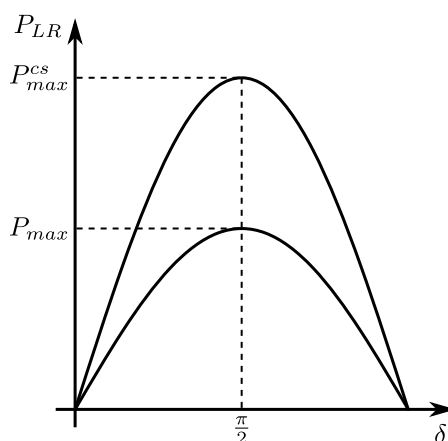


Figura 8 – Curva da potência transferida em função da diferença angular entre barras, δ . P_{max}^{cs} é a potência máxima teórica após a inserção da compensação série.

Segundo (MILLER; BRUNET-WATSON; LEIGHFIELD, 2014), tipicamente, a compensação de reativos varia entre 20% a 80% da reatância da linha de transmissão, sendo que a CS pode ser instalada em ambos os terminais, somente em um dos terminais ou em pontos específicos ao longo da linha (tipicamente em 1/3 e 2/3 ou no centro). Além disso, são instalados reatores na linha ou na barra de forma a evitar a ocorrência de sobretensões quando a linha estiver levemente carregada. A Figura 9 ilustra cada uma das formas de conexão mencionadas.

Em relação a posição da instalação da CS, (MILLER; BRUNET-WATSON; LEIGHFIELD, 2014) lista algumas vantagens e desvantagens. Assim, as principais vantagens de se instalar a CS junto aos terminais da linha de transmissão são:

- Uso de espaço já disponível e sem problemas de acesso quando instalado dentro da subestação;
- Fácil acesso para manutenção e operação;
- Redução de custo com locais para instalação.

Contudo, as principais desvantagens são:

- Necessidade de um nível de compensação maior para causar o mesmo impacto da compensação ao longo da linha;
- Maior corrente de curto-circuito, requerendo um sistema de *bypass* mais robusto.

No caso das instalações da CS ao longo da linha de transmissão, as principais vantagens são:

- Menor corrente de curto-circuito, requerendo um sistema de *bypass* mais robusto;

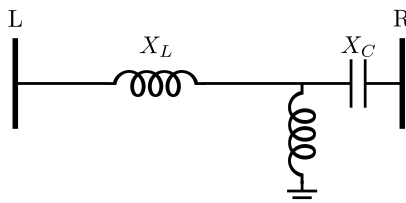
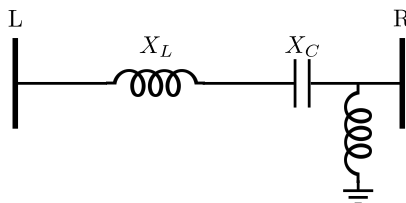
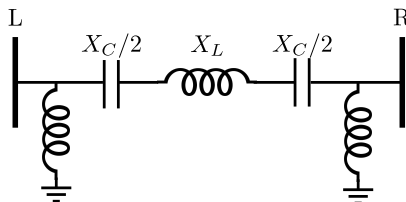
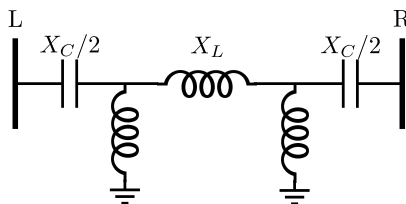
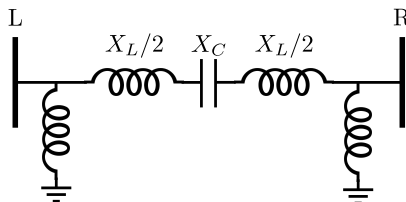
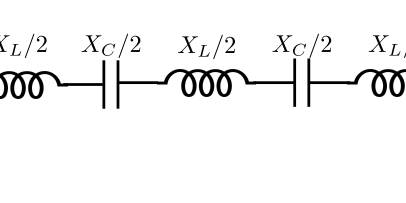
<p>a) Compensação em um terminal, com reator na linha.</p>	
<p>b) Compensação em um terminal, com reator na barra.</p>	
<p>c) Compensação em ambos os terminais, com reatores na linha.</p>	
<p>d) Compensação em ambos os terminais, com reatores nas barras.</p>	
<p>e) Compensação no meio da linha, com reatores nas barras.</p>	
<p>f) Compensação em 1/3 e 2/3 da linha, com reatores nas barras.</p>	

Figura 9 – Formas de instalação da compensação série.

- Uso mais eficiente da CS.

Entretanto, as principais desvantagens são:

- Nem sempre existe a possibilidade de obter um local para instalação;
- Manutenção e operação mais caras, uma vez que as equipes precisam se deslocar até o local da instalação, e disponibilidade de sistemas de comunicação e automação

adicionais aos já existentes nas subestações.

A popularidade desta tecnologia vem crescendo desde o início de sua implementação durante a década de 1950. Além de aumentar a transmissão de energia, a CS também é eficiente em melhorar o desempenho transitório após distúrbios, oscilações amortecidas, regulação de tensão como compensação para perdas de energia reativa, gerenciamento do equilíbrio do fluxo de potência e mitigação de correntes induzidas geomagnéticas (MILLER; BRUNET-WATSON; LEIGHFIELD, 2014).

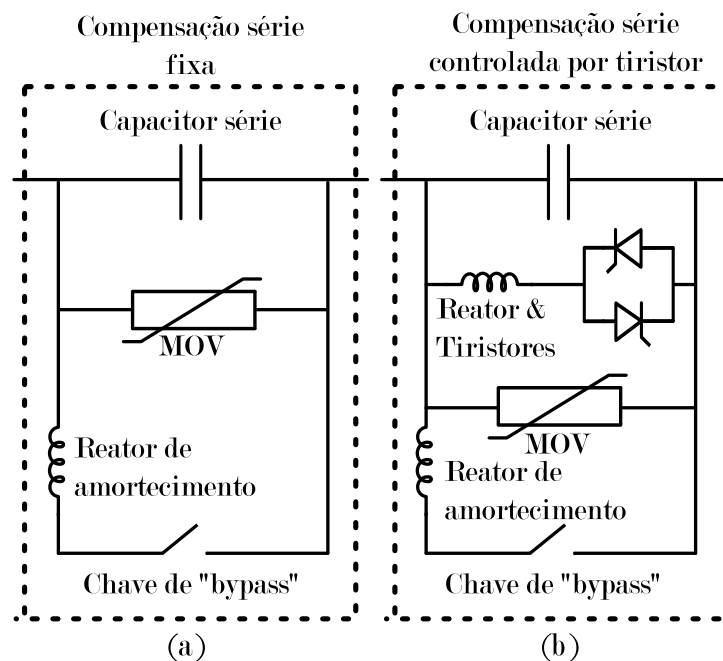


Figura 10 – Projeto básico de compensação série fixa (a) e compensação série controlada por tiristor (b).

A literatura apresenta diversas topologias de CS. Entre elas, dois grupos se destacam: Compensação Série Fixa (CSF) e CSCT. A Figura 10 mostra uma visão geral dessas topologias.

Uma configuração básica do CSF inclui um banco de capacitores em série com elementos de proteção em paralelo a ele, tais como: proteção contra sobretensão e chave de *bypass*. O banco de capacitores de um CSF é fixo, e seu valor nominal se refere às condições normais de operação, uma vez que o superdimensionamento não é atrativo economicamente.

A proteção de sobretensão primária é realizada por um MOV, um elemento não-linear, cuja resistência elétrica varia com a tensão entre seus terminais. Esse elemento serve como um *bypass* para o banco de capacitores durante a ocorrência de faltas, pois conduz livremente sempre que a tensão em seus terminais for superior a um determinado limite. A chave de *bypass* é normalmente aberta e é usada como proteção do MOV, retirando

o banco de capacitores de operação quando o MOV atinge sua capacidade máxima de absorção de energia ou de potência.

O CSF, com seu projeto e implementação de certa maneira simples, além de seus níveis de compensação fixos, é um tipo de compensação ainda comumente encontrada nas redes elétricas. Assim, a comunidade científica vem estudando seus principais desafios e impactos, como estabilidade transitória, estudos de planejamento, problemas de proteção e localização de faltas e ressonância sub-síncrona (ORDÓÑEZ; GÓMEZ-EXPÓSITO; MAZA-ORTEGA, 2021).

O CSCT emprega um projeto semelhante, mas com tiristores antiparalelos controlando um reator de núcleo de ar em paralelo com o capacitor série. A capacidade de controlar a comutação dos tiristores confere ao sistema a vantagem operacional de gerenciar o nível de compensação, variando de valores indutivos a capacitivos através do ângulo de disparo dos tiristores.

Com o desenvolvimento e uso cada vez mais difundido da eletrônica de potência, o CSCT se tornou mais proeminente, apresentando algumas vantagens sobre o CSF, como o seu tempo de resposta mais rápido e a possibilidade de escolher os instantes de comutação dos tiristores, minimizando os transitórios e permitindo um controle rápido e contínuo da compensação. Além disso, eles apresentam um ciclo de vida mais longo devido ao número reduzido de chaves mecânicas, amortecimento de oscilação entre áreas, suporte de tensão e restrição de curto-circuito (ORDÓÑEZ; GÓMEZ-EXPÓSITO; MAZA-ORTEGA, 2021).

Assim, como a modelagem desses elementos pode variar, surgem diferentes desafios operacionais e de planejamento. Cada processo de modelagem introduz mais parâmetros de projeto e, portanto, incertezas que podem induzir a erros e aumentar a complexidade dos processos. Um exemplo é o MOV. Este elemento de proteção não-linear é eficiente para a proteção da CS, pois possibilita um *bypass* instantâneo dos capacitores durante emergências. No entanto, desafia os algoritmos de localização de faltas, pois sua impedância é desconhecida durante a falta. Portanto, entendeu-se que a capacidade de projetar algoritmos eficientes de localização de faltas independentes do modelo da CS é crucial para o planejamento e operação mais eficientes dos sistemas de transmissão.

Algoritmo de otimização

Evolução Diferencial

5

O algoritmo proposto neste trabalho utiliza otimização para localizar a falta na linha de transmissão. O processo consiste em minimizar uma função objetivo dada pelos erros entre os fasores das tensões e correntes pós-falta, calculadas e medidas. Na literatura existem diversos algoritmos de otimização para realizar a minimização de funções objetivo, tais como: Evolução Diferencial (ED) (STORN; PRICE, 1997) e (QING, 2006), AG (MENG *et al.*, 1999), *Simulated Annealing* (SA) (ABDULAL *et al.*, 2011), PS (HOOKE; JEEVES, 1961), dentre outros.

O algoritmo de otimização ED foi proposto por (STORN; PRICE, 1997). Trata-se de um algoritmo de otimização estocástico, cujas variáveis do problema são representadas por um novo vetor de pontos, obtido por meio de um processo que utiliza a diferença entre dois ou mais vetores que tiverem seus pontos escolhidos aleatoriamente. Tal algoritmo é baseado em populações, onde cada indivíduo é relacionado aos outros ou consigo mesmo por meio de processos de cruzamento, mutação e seleção, visando obter indivíduos mais evoluídos.

Segundo (STORN; PRICE, 1997), o algoritmo ED se mostrou superior na minimização de funções não-lineares e não-diferenciáveis em relação aos algoritmos PS e SA. Ainda, em (INGBER; ROSEN, 1992), os AG se mostraram até mesmo iguais ou inferiores aos algoritmos SA. Além disso, segundo (STORN; PRICE, 1997), o algoritmo ED é robusto, prático de utilizar e rápido para convergir.

Neste trabalho foi utilizado o algoritmo de otimização Evolução Diferencial Dinâmica (EDD) proposto por (QING, 2006), um aprimoramento do ED no formato clássico, de (STORN; PRICE, 1997). Os itens 5.1 e 5.2 apresentam, respectivamente, em detalhes a forma clássica e dinâmica do referido algoritmo de otimização.

5.1 Algoritmo Evolução Diferencial clássica

O algoritmo ED na forma clássica apresenta dois estágios: inicialização e evolução. Na inicialização uma população é aleatoriamente gerada. Em seguida, na evolução, tal população passa por mutação diferencial, cruzamento e seleção, gerando uma nova população. Repete-se este processo até que as condições de parada sejam satisfeitas (QING, 2006).

O detalhamento do algoritmo é apresentado a seguir, cujo fluxograma é ilustrado pela Figura 11.

O início do processo ocorre com a geração randômica de uma população inicial \mathbf{X}_0 , onde as populações são constituídas de N_p indivíduos, e realizada a avaliação da função objetivo para cada indivíduo, $f(\mathbf{x}_0)$. Em seguida, é determinado o indivíduo ótimo \mathbf{x}_{otm} , o qual gerou o menor erro de minimização da função objetivo dentre todos os indivíduos de uma população de uma determinada geração, e o valor da função objetivo avaliada para o indivíduo ótimo $f(\mathbf{x}_{otm})$.

Os números da geração n e de indivíduos i são ambos inicializados com valor um, sendo que n pode assumir valores entre 1 e N_{max} e i pode assumir valores entre 1 e N_p . Em seguida, é verificado se os critérios de parada foram satisfeitos pelas condições (5.1).

$$(f(\mathbf{x}_{otm}) \leq \epsilon) \vee (n = N_{max}) \quad (5.1)$$

onde,

- ϵ é uma constante que corresponde ao valor mínimo que se deseja alcançar para o erro de minimização da função objetivo;
- N_{max} é uma constante que corresponde ao número máximo de gerações.

Caso os critérios de parada tenham sido satisfeitos, o processo de otimização termina e retorna o x_{otm} encontrado. Caso contrário, ocorre a criação de candidatos para uma nova geração de indivíduos pela mutação diferencial e cruzamento, dada por (5.2) e (5.3), respectivamente.

$$\mathbf{v}_{n+1,i} = \mathbf{x}_{otm} + \beta [\mathbf{x}_{n,p1} - \mathbf{x}_{n,p2}] \quad (5.2)$$

$$\mathbf{y}_{n+1,i} = \begin{cases} \mathbf{v}_{n+1,i}, & \text{com prob. de cruzamento } \gamma \\ \mathbf{x}_{n,i} & \end{cases} \quad (5.3)$$

onde,

- \mathbf{v} é o indivíduo criado pelo processo de mutação diferencial;

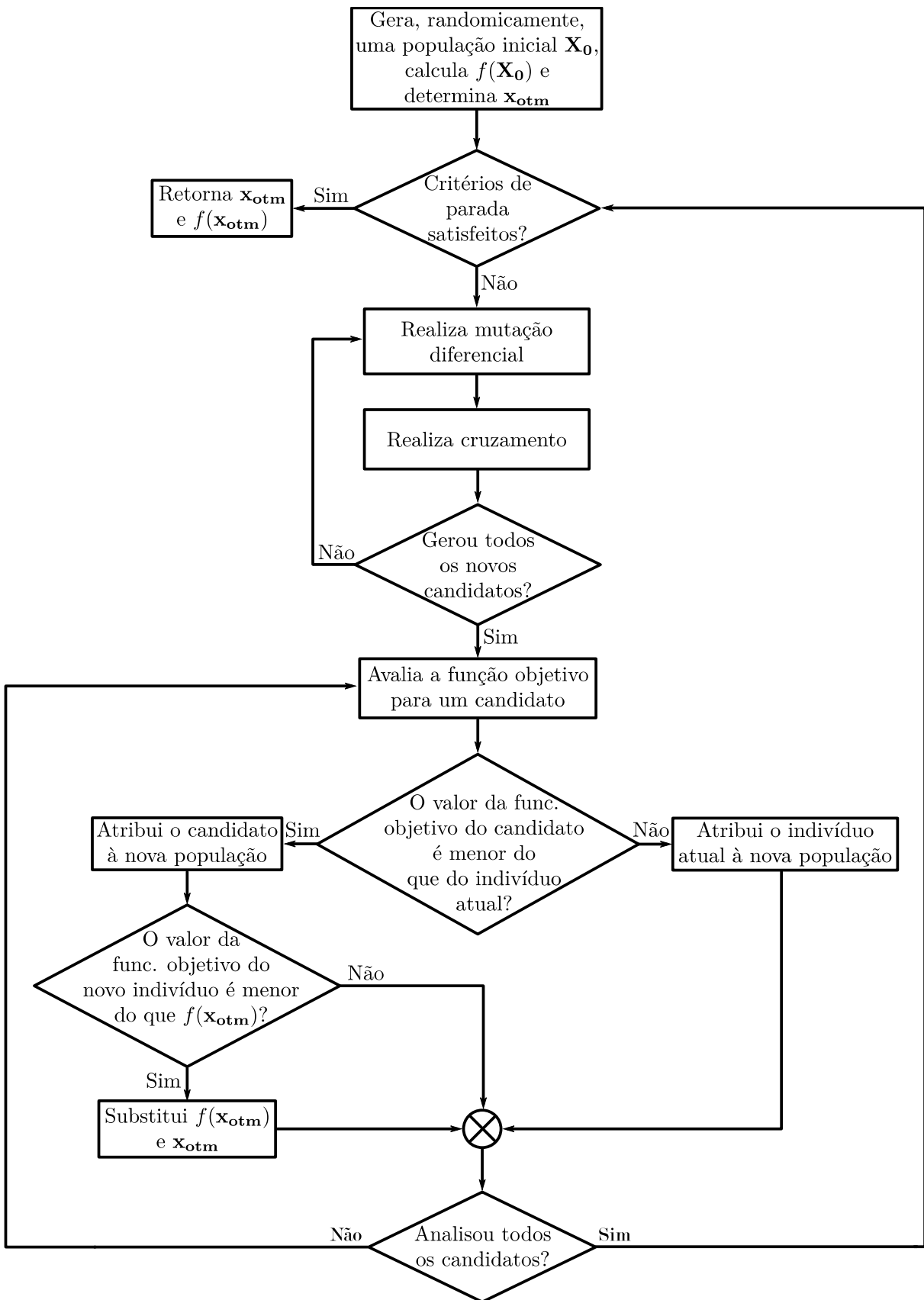


Figura 11 – Fluxograma do algoritmo de otimização ED.

- β é o coeficiente de combinação, com valor definido entre 0 e 1;
- \mathbf{x} é um indivíduo, sendo que os indivíduos são vetores cujos componentes são as variáveis a serem otimizadas e são pertencentes à população \mathbf{X} ;
- $\mathbf{p1}$ e $\mathbf{p2}$ são índices aleatórios que apontam para indivíduos pertencentes à população \mathbf{X} . Os indivíduos selecionados por $\mathbf{p1}$ e $\mathbf{p2}$ devem ser distintos;
- \mathbf{y} é o indivíduo criado pelo cruzamento;
- γ é a probabilidade de cruzamento, com valor definido entre 0 e 1;

Posteriormente, é verificado se todos os candidatos para a nova geração foram criados. Em caso positivo, é realizada a avaliação da função objetivo para cada indivíduo candidato à nova geração, onde é comparado o valor da função objetivo do candidato à nova geração $f(\mathbf{y}_{n+1,i})$ com o valor da geração atual $f(\mathbf{x}_{n,i})$.

O resultado da avaliação leva à duas condições de julgamento para o algoritmo. A primeira condição é caso o resultado da avaliação seja negativo, ou seja, $f(\mathbf{y}_{n+1,i}) > f(\mathbf{x}_{n,i})$. Neste caso, o indivíduo da geração atual $\mathbf{x}_{n,i}$ é atribuído à nova geração $\mathbf{x}_{n+1,i}$. A segunda condição, é a condição complementar, ou seja, $f(\mathbf{y}_{n+1,i}) \leq f(\mathbf{x}_{n,i})$, que caso seja satisfeita o candidato à nova geração $\mathbf{y}_{n+1,i}$, criado pelo processo de cruzamento, é atribuído à nova geração $\mathbf{x}_{n+1,i}$.

Em seguida, é avaliado se o valor da função objetivo do candidato selecionado à nova geração $f(\mathbf{x}_{n+1,i})$ é menor do que o valor da função objetivo obtido pelo melhor indivíduo $f(\mathbf{x}_{otm})$. Em caso positivo, o indivíduo ótimo \mathbf{x}_{otm} adquire o valor do indivíduo atribuído à esta nova geração $\mathbf{x}_{n+1,i}$.

Por fim, ao completar a população com a nova geração, o algoritmo começa um novo ciclo de avaliação para criar a geração seguinte, terminando sua execução quando um dos critérios de parada tenha sido satisfeito.

5.2 Algoritmo Evolução Diferencial Dinâmica

O algoritmo EDD foi proposto por (QING, 2006) para corrigir uma limitação que, segundo ele, existe no algoritmo de ED clássica. A limitação ocorre na forma como o algoritmo realiza a avaliação dos indivíduos para criar a população da nova geração, onde não é possível acompanhar a evolução da população de imediato, tornando a convergência do algoritmo mais lenta. Tal fato ocorre pois um indivíduo criado em uma determinada geração, que gerou um erro de minimização menor que um indivíduo da geração atual, somente poderá participar na criação de novos indivíduos na geração seguinte (QING, 2006).

Desta forma, (QING, 2006) sugeriu uma modificação no formato do algoritmo de otimização clássico para corrigir essa limitação, denominando-o EDD. A alteração consiste em utilizar um novo indivíduo que gerou um erro de minimização menor do que algum indivíduo da população para substituí-lo e, então, participar da criação de novos indivíduos ainda na geração atual. Resultados em (QING, 2006) apontam que tal modificação tornou a convergência do algoritmo mais rápida.

O detalhamento do algoritmo EDD é apresentado a seguir, cujo fluxograma é ilustrado pela Figura 12.

Inicialmente é gerada, randomicamente, uma população inicial e realizada a avaliação da função objetivo para cada indivíduo. Em seguida, é determinado o indivíduo ótimo e o valor da sua função objetivo.

As variáveis n e i são inicializados ambas com valor um. Posteriormente, é verificado se os critérios de parada foram satisfeitos por (5.1). Em caso positivo, a execução termina e o indivíduo ótimo é retornado pelo algoritmo. Se não, ocorre a criação de candidatos para uma nova geração de indivíduos pela mutação diferencial e cruzamento, dada por (5.2) e (5.3), respectivamente.

Em seguida, é realizada a avaliação da função objetivo para o indivíduo candidato à nova geração, verificando se o valor da função objetivo do candidato $\mathbf{y}_{n+1,i}$ é menor do que o valor da geração atual $\mathbf{x}_{n,i}$. Em caso negativo, o candidato é descartado. Sendo que, em caso positivo, o candidato é atribuído à nova geração. É importante observar que, nesse caso, os novos indivíduos participam dos processos de mutação e cruzamento para gerar outros novos indivíduos, tornando o processo dinâmico.

Em seguida, é avaliado se o valor da função objetivo do candidato selecionado à nova geração é menor do que o valor da função objetivo para o indivíduo ótimo $\mathbf{f}(\mathbf{x}_{\text{otm}})$. Em caso positivo, o indivíduo ótimo adquire o valor do novo indivíduo atribuído à esta nova geração.

Por fim, ao completar a população com a nova geração, o algoritmo começa um novo ciclo de avaliação para criar a geração seguinte, terminando sua execução quando um dos critérios de parada tenha sido satisfeito.

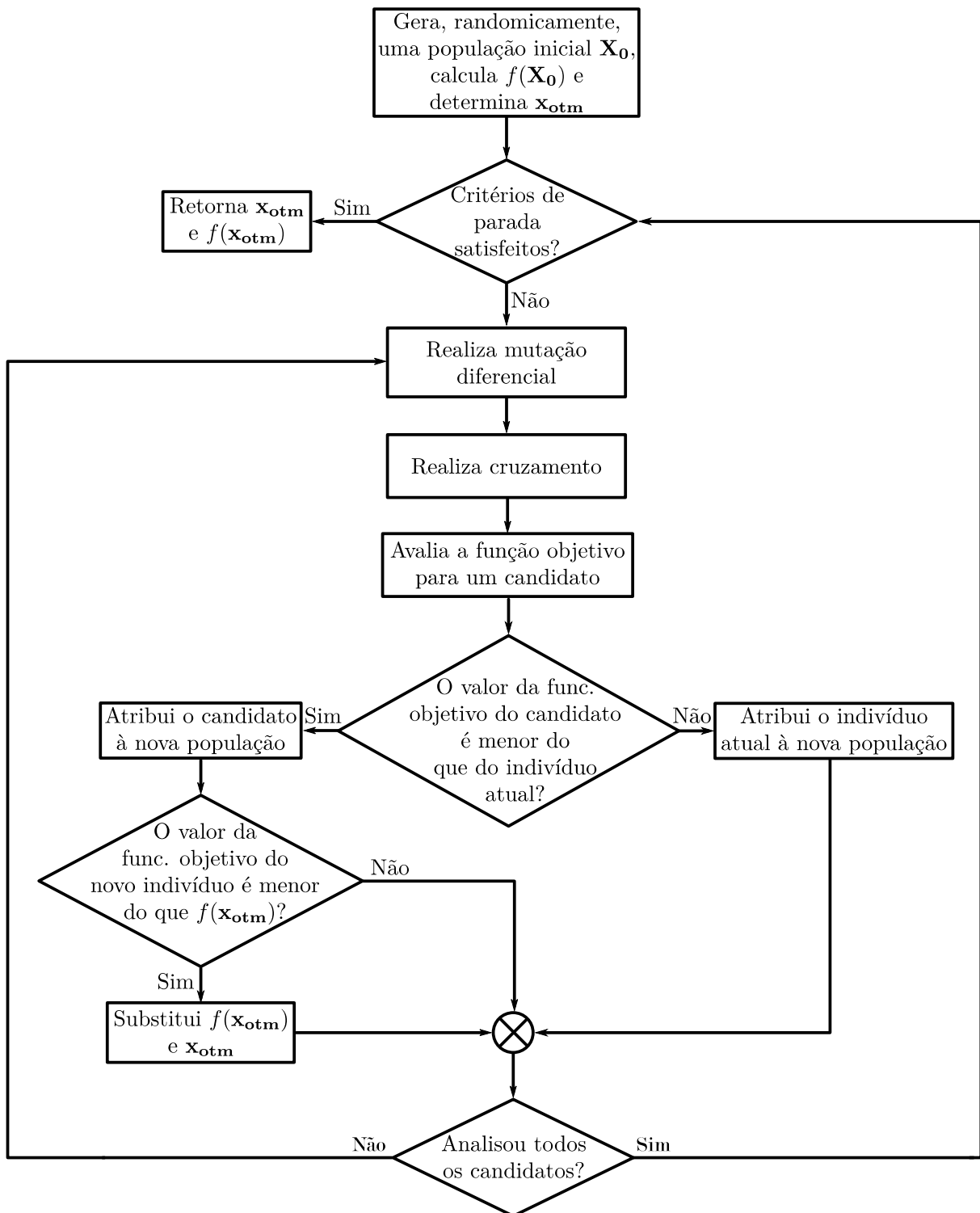


Figura 12 – Fluxograma do algoritmo de otimização EDD.

Metodologia de localização de faltas em linhas de transmissão compensadas

6

A proposta de uma nova metodologia para localização de faltas em linhas com compensação série é necessária, pois, conforme o Capítulo 3 desta tese, os métodos atualmente existentes possuem diversas deficiências, como:

- necessidade de dados de tensão e corrente do período pós-falta em que a CS, da fase em falta, foi removida pela proteção;
- conhecimento prévio das características físicas, como por exemplo a curva do MOV, e construtivas da CS;
- inviabilidade de aplicação à todos os tipos de falta no caso de métodos que não necessitam das características físicas e construtivas da CS;
- limitações relativas à posição da compensação série na linha para a localização da falta.

Desta forma, a contribuição deste trabalho é a proposta de um método de localização de faltas que atenda à todos os problemas mencionados com eficiência e robustez.

O método utiliza dados de tensão e corrente adquiridos dos dois terminais da linha de transmissão e pode localizar faltas de qualquer tipo sem a necessidade do modelo da CS, independente da sua posição na linha de transmissão. Ainda, o método não necessita que os dados de tensão e corrente disponíveis incluam um período pós-falta, no qual a compensação série foi removida pela proteção, para iniciar o processo de localização da falta.

De forma geral, o método realiza as seguintes etapas para localizar a falta:

- aquisição dos sinais de tensão e corrente e leitura dos dados da rede elétrica a ser analisada;
- filtragem, sincronização dos sinais de tensão e corrente e seleção da janela de dados para extração dos fasores;
- modelagem da rede elétrica na condição pré-falta;
- localização da falta.

Desta maneira, este capítulo está dividido nos itens 6.1, 6.2 e 6.3. O item 6.1 descreve o processo de filtragem, sincronização e extração dos fasores dos sinais de tensão e corrente medidos nos terminais da linha de transmissão, o item 6.2 descreve a modelagem dos componentes da rede elétrica e o item 6.3 descreve a metodologia de localização da falta.

6.1 Filtragem, sincronização e extração dos fasores dos sinais de tensão e corrente

A filtragem dos sinais de tensão e corrente adquiridos dos terminais da linha deve ser realizada antes da execução de qualquer etapa subsequente do método. Desta maneira, problemas com *aliasing* e ruídos espúrios são mitigados e erros na localização da falta são evitados.

Para a filtragem dos sinais foi utilizado um filtro passa-baixa digital de Butterworth. O projeto do filtro passa-baixa de Butterworth consiste em definir a frequência e a atenuação máxima da faixa de passagem e a frequência e a atenuação mínima da faixa de rejeição (DI SANTO, 2010).

Os sinais de tensão e corrente utilizados neste trabalho possuem frequência de amostragem de 3840 [Hz] ou 64 amostras por ciclo de 60 [Hz]. Desta forma, conforme mostra a Figura 13, os valores atribuídos para a frequência de corte e para a atenuação máxima da faixa de passagem foram 90 [Hz] e 3 [dB], respectivamente. Já os valores atribuídos para a frequência de corte e para a atenuação mínima da faixa de rejeição foram 1920 [Hz] e 40 [dB]. O valor de 1920 [Hz] é a frequência de Nyquist, que neste trabalho é a metade da frequência de amostragem dos sinais de tensão e corrente.

Após a filtragem, os sinais de tensão e corrente de ambos os terminais da linha de transmissão devem ser sincronizados. Os sinais possuem a mesma referência temporal (fornecida pelo Global Positioning System (GPS)), no entanto, podem não ser amostrados no mesmo instante de tempo, conforme ilustra a Figura 14. A falta de sincronismo causa erro angular entre os fasores dos sinais de tensão e corrente dos terminais da linha de

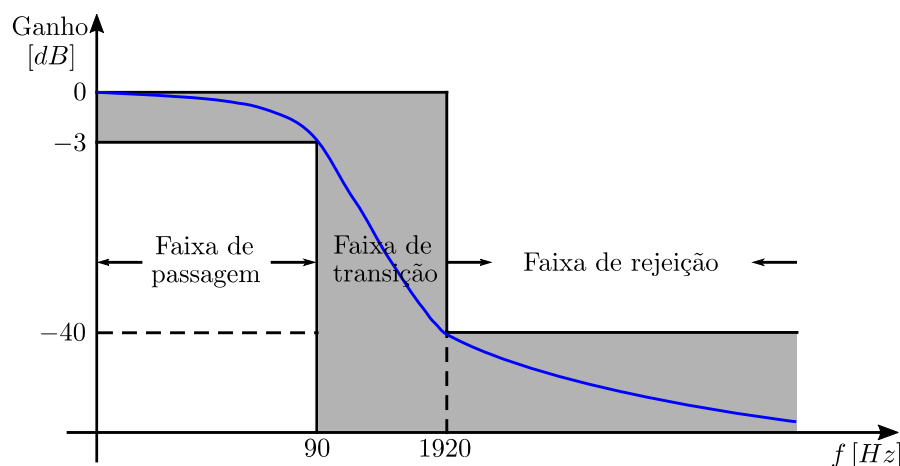


Figura 13 – Parâmetros de projeto de filtros passa-baixas de Butterworth

transmissão. Desta forma, os sinais de um dos terminais são sincronizados em relação ao terminal de referência por meio de um processo de interpolação.

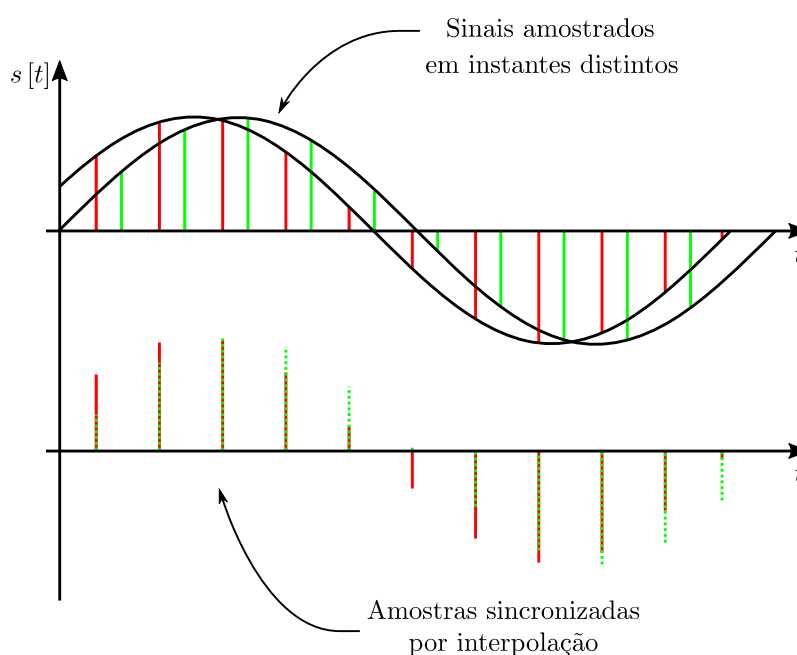


Figura 14 – Sincronização dos sinais por interpolação

Outra maneira de sincronizar os fasores de tensão e corrente de pré-falta e pós-falta entre os terminais da linha de transmissão é multiplicar os fasores de um dos terminais por $e^{j\theta}$. O ângulo θ pode ser determinado calculando os fasores pré-falta de um dos terminais utilizando o quadripolo da linha de transmissão e os fasores pré-falta do terminal oposto (DI SANTO; PEREIRA, 2015).

Neste trabalho, optou-se por utilizar a sincronização dos sinais utilizando interpolação, conforme descrito anteriormente. Esta escolha foi baseada no fato de disponibilizar os fasores de pré-falta e pós-falta aos algoritmos responsáveis pela localização de faltas

sem a necessidade de envolver cálculos da rede de transmissão.

Antes de realizar a extração dos fasores dos sinais de tensão e corrente é necessário determinar a janela de dados dos períodos de pré-falta e pós-falta, definidos pelo instante de ocorrência da falta. No período de pós-falta, caso a potência ou a energia absorvida pelo MOV atinja seu valor máximo, ocorre a atuação do sistema de proteção da compensação série. Esta atuação curto-circuita todos os elementos da compensação, inclusive o capacitor série, levando à descontinuidade dos sinais e, desta forma, à erros nos cálculos dos fasores.

Dessa forma, a seleção adequada do intervalo de dados deve considerar a maior janela, sem chaveamentos, comum a todos os sinais de cada terminal. Neste trabalho, a seleção foi feita considerando conhecidos o instante de falta e os tempos de atuação da proteção em cada fase. Como exemplo, a Figura 15 ilustra as correntes das três fases de um dos terminais sobrepostas pelos sinais de comando da proteção, além das janelas sem chaveamentos. Neste caso a Janela 1 é a selecionada.

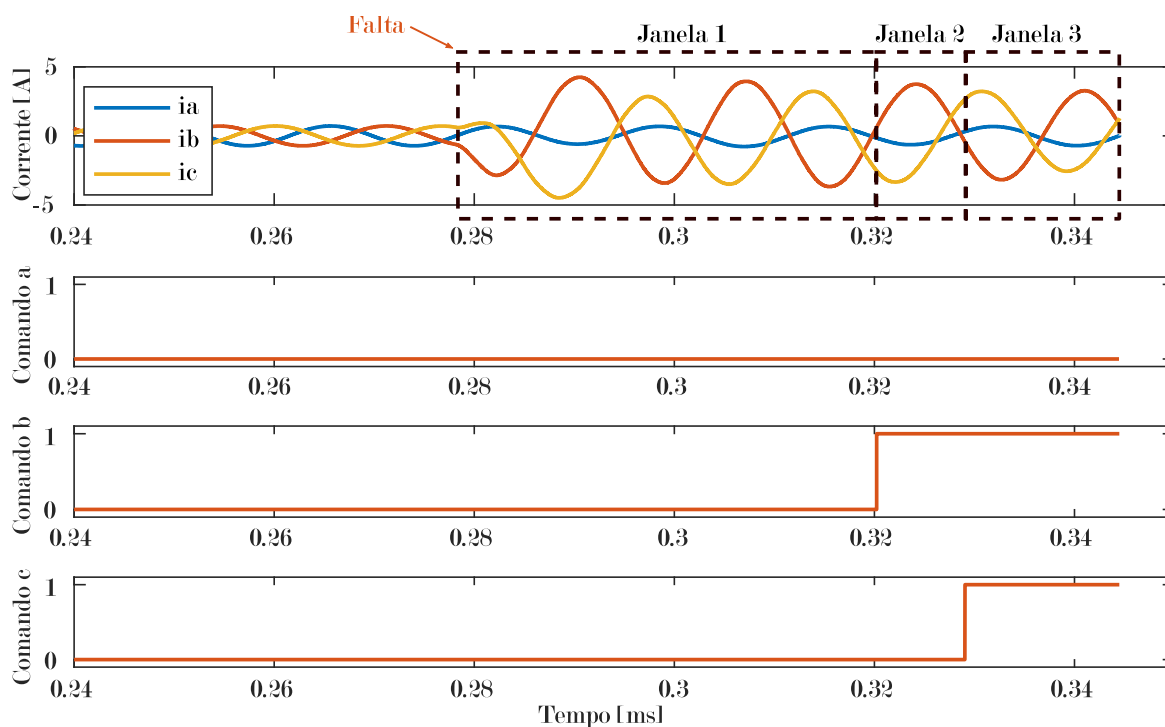


Figura 15 – Seleção da janela de dados (nesse caso é escolhida a Janela 1). Sinais de corrente na relação 3000:1.

O processo de extração dos fasores dos sinais de tensão e corrente pré e pós-falta de ambos os terminais da linha de transmissão é realizado com os dados selecionados dos sinais já filtrados e sincronizados.

Os sinais de tensão e corrente após a falta podem apresentar, além da componente fundamental e suas múltiplas de ordem superior, componentes aperiódicas e de baixa frequência (conhecidas também como subsíncronas). Desta forma, o algoritmo de extração

dos fasores deve ser capaz de reconhecer e, portanto, filtrar todas as componentes com exceção da fundamental.

(BAINS; ZADEH, 2015) desenvolveram uma metodologia para realizar a extração dos fasores aplicando o filtro de Prony juntamente com a Transformada Rápida de Fourier (FFT) ¹. Segundo os autores, esta metodologia é adequada para se extrair os fasores de sinais compostos de componentes aperiódicas e subsíncronas, o que é o caso quando da ocorrência de faltas em linhas de transmissão com compensação série. A componente subsíncrona surge da oscilação entre a capacitância da compensação e a indutância da linha de transmissão.

Quando da ocorrência de uma falta, os sinais de tensão e corrente podem ser representados por três componentes somadas, sendo a primeira a componente fundamental, a segunda as harmônicas múltiplas inteiras da fundamental e a terceira a componente que representa, conjuntamente, as componentes com decaimento exponencial e subsíncronas, nomeadas deste ponto em diante de componentes transitórias. Em (6.1) é mostrado um sinal composto, respectivamente, pelas três componentes.

$$s(t) = a_1 \cos(\omega_1 t + \theta_1) + \sum_{m=1}^L a_m \cos(\omega_m t + \theta_m) + \sum_{k=1}^p b_k e^{\frac{-t}{\tau_k}} \cos(\omega_k t + \theta_k) \quad (6.1)$$

Onde,

- a_1 é a amplitude da componente fundamental do sinal;
- ω_1 é a frequência angular da componente fundamental do sinal;
- θ_1 é a fase da componente fundamental do sinal;
- m é a ordem da componente harmônica múltipla inteira da fundamental;
- a_m é a amplitude da componente harmônica múltipla inteira da fundamental;
- ω_m é a frequência angular da componente harmônica múltipla inteira da fundamental;
- θ_m é a fase da componente harmônica múltipla inteira da fundamental;
- k é a ordem da componente transitória do sinal;
- b_k é a amplitude da componente transitória do sinal;
- τ_k é a constante de decaimento da componente transitória do sinal;
- ω_k é a frequência angular da componente componente transitória do sinal;

¹ Mais comumente conhecida por seu termo em inglês *Fast Fourier Transform*.

- θ_k é a fase da componente transitória do sinal;

As componentes harmônicas múltiplas inteiras da componente fundamental poderiam ser facilmente removidas aplicando diretamente a FFT no sinal. No entanto, a presença de componentes transitórias no sinal pode acarretar erros na filtragem ao utilizar apenas a FFT.

Deste modo, uma forma de retirar as componentes transitórias do sinal é identificá-las e subtraí-las do mesmo e, então, utilizar a FFT para obter a componente fundamental do sinal e, por conseguinte, extrair o fasor. Para alcançar este resultado, é utilizada a abordagem descrita adiante.

Tomando-se a média em um ciclo da componente fundamental do sinal $s[t]$, a componente fundamental e as componentes harmônicas múltiplas inteiras desta desaparecem, restando apenas a média da componente transitória do sinal, resultando em (6.2).

$$s_{\text{med}}(t) = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \sum_{k=1}^p b_k e^{\frac{-\zeta}{\tau_k}} \cos(\omega_k \zeta + \theta_k) d\zeta \quad (6.2)$$

Onde T é o período de um ciclo da componente fundamental do sinal $s(t)$.

Utilizando o fato que a integral da soma é igual à soma das integrais, então:

$$s_{\text{med}}(t) = \sum_{k=1}^p \frac{1}{T} \int_t^{t+T} b_k e^{\frac{-\zeta}{\tau_k}} \cos(\omega_k \zeta + \theta_k) d\zeta \quad (6.3)$$

Tomando a parte interna do somatório e chamando-a de $s_{\text{med}}^k(t)$, tem-se:

$$s_{\text{med}}^k(t) = \int_t^{t+T} b_k e^{\frac{-\zeta}{\tau_k}} \cos(\omega_k \zeta + \theta_k) d\zeta \quad (6.4)$$

Resolvendo (6.4), obtêm-se:

$$s_{\text{med}}^k(t) = \frac{b_k \tau_k e^{\frac{-(T+t)}{\tau_k}}}{T [1 + (\omega_k \tau_k)^2]} \left\{ -\cos[\theta_k + \omega_k (T + t)] + \omega_k \tau_k \sin[\theta_k + \omega_k (T + t)] \right. \\ \left. + e^{\frac{T}{\tau_k}} [\cos(\theta_k + \omega_k t) - \omega_k \tau_k \sin(\theta_k + \omega_k t)] \right\} \quad (6.5)$$

Aplicando relações trigonométricas e rearranjando (6.5), chega-se na seguinte

equação:

$$s_{\text{med}}^k(t) = \frac{b_k \tau_k e^{-\frac{T}{\tau_k}}}{T \sqrt{1 + (\omega_k \tau_k)^2}} \sqrt{1 + e^{\frac{2T}{\tau_k}} - 2e^{\frac{T}{\tau_k}} \cos(\omega_k T)} e^{-\frac{t}{\tau_k}} \cos \left\{ \omega_k t + \theta_k + \tan^{-1} \left(\frac{-1}{\omega_k \tau_k} \right) + \tan^{-1} \left[\frac{\sin(\omega_k T)}{\cos(\omega_k T) - e^{\frac{T}{\tau_k}}} \right] - \frac{\pi}{2} \right\} \quad (6.6)$$

A equação (6.6) pode ser escrita na forma:

$$s_{\text{med}}^k(t) = \tilde{b}_k e^{-\frac{t}{\tau_k}} \cos \left\{ \omega_k t + \tilde{\theta}_k \right\} \quad (6.7)$$

Onde,

$$\tilde{b}_k = \frac{b_k \tau_k e^{-\frac{T}{\tau_k}}}{T \sqrt{1 + (\omega_k \tau_k)^2}} \sqrt{1 + e^{\frac{2T}{\tau_k}} - 2e^{\frac{T}{\tau_k}} \cos(\omega_k T)} \quad (6.8)$$

e

$$\tilde{\theta}_k = \theta_k + \tan^{-1} \left(\frac{-1}{\omega_k \tau_k} \right) + \tan^{-1} \left[\frac{\sin(\omega_k T)}{\cos(\omega_k T) - e^{\frac{T}{\tau_k}}} \right] - \frac{\pi}{2} \quad (6.9)$$

Assim, por meio de (6.8) e (6.9) são calculados os valores de b_k e θ_k , que são os valores originais de amplitude e fase de cada componente do sinal transitório, ou seja, antes do cálculo do valor médio. No entanto, para que sejam possíveis os cálculos destas quantidades e também remontar o sinal transitório original, são necessários o conhecimento prévio dos valores de \tilde{b}_k , $\tilde{\theta}_k$, τ_k e ω_k , os quais são obtidos pela aplicação do método de Prony² ao valor médio de $s(t)$, ou seja, em $s_{\text{med}}(t)$.

Uma vez determinados, os sinais transitórios são subtraídos do sinal original, restando apenas a componente fundamental e suas harmônicas inteiras.

Aos sinais resultantes é, então, aplicado o filtro FFT que fornece em sua saída as amplitudes e fases da componente fundamental e das harmônicas múltiplas inteira da fundamental dos sinais. Considerando apenas a amplitude e a fase da componente fundamental dos sinais, os fasores destes sinais são obtidos.

Os fasores precisam de uma referência para as suas fases, deste modo um dos fasores é escolhido como referência e a fase dos demais corrigidas para esta referência. No caso deste trabalho foi escolhido o fasor da tensão da fase A do terminal local.

² Para detalhes sobre o método de Prony consulte o Apêndice A.

6.2 Modelagem da rede elétrica

Para realizar os processos de localização da falta, o método necessita conhecer a topologia da rede elétrica na qual houve a ocorrência da falta. Uma rede elétrica é composta por diversos componentes, tais como geradores, linhas de transmissão, transformadores, compensadores série, banco de reatores, dentre outros, como os equipamentos de proteção e controle.

O método de localização de faltas proposto neste trabalho é capaz de localizar faltas em redes compostas por esses componentes, desde que sejam adequadamente modelados no sistema de equações nodais da rede. Para isto, é empregada a teoria dos grafos orientados (GRAINGER; STEVENSON, 1994).

A teoria dos grafos orientados permite que a estrutura física da rede elétrica seja representada de maneira organizada, evitando-se, desta forma, erros na modelagem, como é o caso quando se utiliza o método por inspeção. O objetivo da aplicação desta teoria é obter o sistema de equações nodais da rede elétrica.

Desta forma, a teoria dos grafos divide a modelagem da rede elétrica em duas partes, uma delas representada por uma matriz contendo as admitâncias primitivas dos componentes que compõem a rede e a outra representada por uma matriz, chamada de matriz de incidências, contendo a maneira como estas admitâncias estão conectadas, ou seja, a topologia da rede elétrica.

Como exemplo, considere o circuito monofásico ilustrado pela Figura 16a.

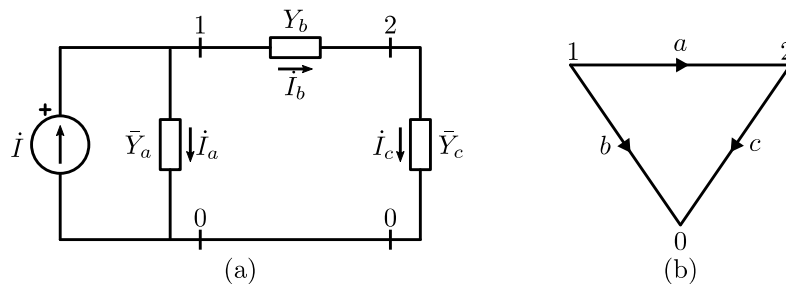


Figura 16 – (a) Circuito monofásico. (b) Grafo orientado do circuito.

Este circuito possui três admitâncias primitivas: \bar{Y}_a , \bar{Y}_b e \bar{Y}_c . Estas admitâncias primitivas podem ser dispostas em uma matriz de primitivas do circuito (6.10).

$$\mathbf{Y}_{pr} = \begin{bmatrix} \bar{Y}_a & 0 & 0 \\ 0 & \bar{Y}_b & 0 \\ 0 & 0 & \bar{Y}_c \end{bmatrix} \quad (6.10)$$

Ainda, por meio do grafo orientado ilustrado pela Figura 16b, a matriz de incidências

(6.11) pode ser obtida.

$$\mathbf{Q} = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 \end{matrix} \\ \begin{matrix} a \\ b \\ c \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & -1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (6.11)$$

Na formação da matriz de incidências, aplicam-se as seguintes regras:

- 1) O nó de referência é desconsiderado;
- 2) O elemento a_{ij} recebe o valor 1 se o ramo i é orientado³ para fora do nó j ;
- 3) O elemento a_{ij} recebe o valor -1 se o ramo i é orientado para dentro do nó j ;
- 4) O elemento a_{ij} recebe o valor 0 se o ramo i não é incidente ao nó j .

Desta forma, pode-se escrever o sistema nodal que descreve o circuito da seguinte forma:

$$\mathbf{Q}^T \mathbf{Y}_{pr} \mathbf{Q} \begin{bmatrix} \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{I} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6.12)$$

onde,

$$\mathbf{Y}_{bus} = \mathbf{Q}^T \mathbf{Y}_{pr} \mathbf{Q} \quad (6.13)$$

é a matriz de admitâncias nodal do circuito e $[.]^T$ representa matriz transposta.

Assim, os itens 6.2.1 a 6.2.6 a seguir mostram como os geradores, linhas de transmissão, transformadores, compensação série, banco de reatores, equivalentes de trechos da rede e as faltas foram modelados neste trabalho.

6.2.1 Geradores síncronos e equivalentes de rede

Os geradores síncronos são comumente empregados na geração de energia elétrica cujos recursos energéticos advêm de fontes hidráulicas e térmicas. Geralmente, eles são caracterizados pela construção dos seus rotores: polos lisos ou salientes.

Os geradores síncronos de polos lisos geralmente são empregados em aplicações em que o rotor opera em alta velocidade, como por exemplo, em usinas termoelétricas. Este tipo de gerador possui rotor com pequeno diâmetro e grande comprimento, além de um número reduzido de polos. Já os geradores de polos salientes geralmente são empregados

³ A orientação dos ramos segue o sentido atribuído às correntes no circuito.

em aplicações onde a velocidade é um fator limitante, como em hidrelétricas, possuindo rotores de grande diâmetro, eixos curtos e um número elevado de polos (GRAINGER; STEVENSON, 1994) (KUNDUR, 1994).

Assim, o modelo do gerador síncrono, além de outros fatores, depende dessa característica. No entanto, nos problemas de localização de faltas utilizando fasores, os geradores síncronos podem ser representados, tanto os de polos lisos quanto os de polos salientes, por seu modelo de curto circuito, ou seja, por uma fonte de tensão em série com suas reatâncias de dispersão de curto-circuito.

Portanto, o modelo de ambos os tipos são similares, diferenciando-se somente pelos valores das reatâncias de dispersão. No gerador de polos lisos, as reatâncias de dispersão de curto-circuito de sequência positiva são iguais as de sequência negativa, sendo diferentes no gerador de polos salientes. A impedância de sequência zero é diferente em ambos os tipos. A Figura 17 ilustra o circuito equivalente do gerador representado nas componentes de sequência positiva, negativa e zero.

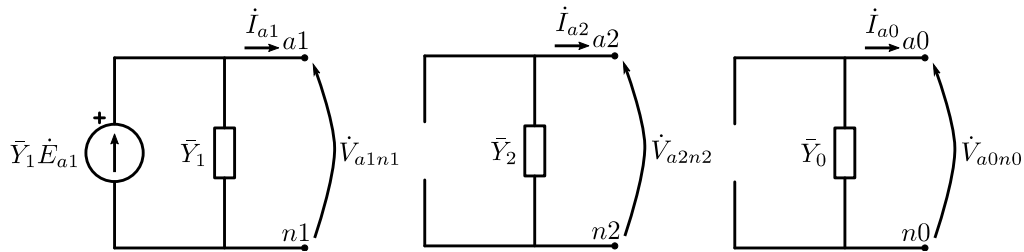


Figura 17 – Circuito equivalente do gerador síncrono representado nas componentes de sequência positiva (1), negativa (2) e zero (0).

Desta forma, tomando o circuito equivalente do gerador síncrono, seja de polos lisos ou salientes, ilustrado pela Figura 17, pode-se escrever a seguinte relação entre as tensões e as correntes, em componentes de fase, nos seus terminais (6.14).

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{bmatrix} = -\mathbf{T} \begin{bmatrix} \bar{Y}_0 & 0 & 0 \\ 0 & \bar{Y}_1 & 0 \\ 0 & 0 & \bar{Y}_2 \end{bmatrix} \mathbf{T}^{-1} \begin{bmatrix} \dot{V}_{an} \\ \dot{V}_{bn} \\ \dot{V}_{cn} \end{bmatrix} + \mathbf{T} \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{Y}_1 \dot{E}_{a1} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6.14)$$

onde,

- \dot{I}_a , \dot{I}_b e \dot{I}_c são, respectivamente, as correntes nas fases a , b e c do terminal gerador;
- \mathbf{T} é a matriz de transformação de componentes simétricas em componentes de fase;
- \bar{Y}_0 , \bar{Y}_1 e \bar{Y}_2 são, respectivamente, as admitâncias de sequência zero, positiva e negativa do gerador;
- \dot{V}_{an} , \dot{V}_{bn} e \dot{V}_{cn} são, respectivamente, as tensões nas fases a , b e c do terminal gerador;

- \dot{E}_{a1} é a tensão interna de sequência positiva do gerador.

De (6.14), tem-se que a matriz de admitâncias primitiva do gerador, em componentes de fase, é:

$$\mathbf{Y}_G = \mathbf{T} \begin{bmatrix} \bar{Y}_0 & 0 & 0 \\ 0 & \bar{Y}_1 & 0 \\ 0 & 0 & \bar{Y}_2 \end{bmatrix} \mathbf{T}^{-1} \quad (6.15)$$

Os equivalentes de porções da rede, vistos dos terminais das linhas de transmissão, podem ser modelados de forma similar aos geradores síncronos, ou seja, por meio de impedâncias em série com fontes de tensão.

6.2.2 Linhas de transmissão

O SIN é um sistema complexo com linhas de transmissão variando de poucas dezenas de quilômetros até centenas ou milhares de quilômetros. Desta forma, os métodos de localização de faltas que utilizam a modelagem da rede elétrica, como é o caso do método proposto neste trabalho, devem agregar modelos precisos das linhas de transmissão para informar o correto local de ocorrência da falta à equipe de manutenção.

Assim, neste trabalho, as linhas de transmissão foram modeladas utilizando o modelo π -equivalente, ou seja, considerando seus parâmetro distribuídos ao longo da extensão da linha, conforme apresentado em (BOWMAN; MCNAMEE, 1964).

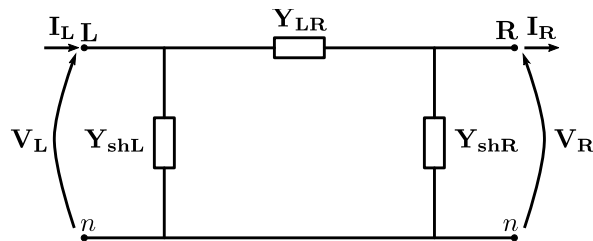


Figura 18 – Modelo π -equivalente da linha de transmissão

Conforme a Figura 18, a relação entre as tensões e correntes entre os terminais, local (L) e remoto (R) da linha de transmissão podem ser descritos como:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{V}_L \\ \mathbf{I}_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}(x) & \mathbf{B}(x) \\ \mathbf{C}(x) & \mathbf{D}(x) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_R \\ \mathbf{I}_R \end{bmatrix} \quad (6.16)$$

onde,

- $\mathbf{V}_L = \begin{bmatrix} \dot{V}_{anL} \\ \dot{V}_{bnL} \\ \dot{V}_{cnL} \end{bmatrix}$ é o vetor das tensões de fase no terminal local da linha;
- $\mathbf{V}_R = \begin{bmatrix} \dot{V}_{anR} \\ \dot{V}_{bnR} \\ \dot{V}_{cnR} \end{bmatrix}$ é o vetor das tensões de fase no terminal remoto da linha;
- $\mathbf{I}_L = \begin{bmatrix} \dot{I}_{aL} \\ \dot{I}_{bL} \\ \dot{I}_{cL} \end{bmatrix}$ é o vetor das correntes entrando no terminal local da linha;
- $\mathbf{I}_R = \begin{bmatrix} \dot{I}_{aR} \\ \dot{I}_{bR} \\ \dot{I}_{cR} \end{bmatrix}$ é o vetor das correntes saindo do terminal remoto da linha.

Ainda, os coeficientes \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{C} e \mathbf{D} , que neste caso geral são matrizes, são as constantes do quadripolo formado pelo circuito equivalente da linha de transmissão. Estas constantes são funções do comprimento da linha x e, segundo (BOWMAN; MCNAMEE, 1964), podem ser determinadas da seguinte forma:

$$\mathbf{A}(x) = \mathbf{y}^{-1} \mathbf{M} [\cosh(\gamma_i x)]_D \mathbf{M}^{-1} \mathbf{y} \quad (6.17)$$

$$\mathbf{B}(x) = \mathbf{y}^{-1} \mathbf{M} [\gamma_i \sinh(\gamma_i)]_D \mathbf{M}^{-1} \quad (6.18)$$

$$\mathbf{C}(x) = x \mathbf{M} \left[\frac{\sinh(\gamma_i x)}{\gamma_i x} \right]_D \mathbf{M}^{-1} \mathbf{y} \quad (6.19)$$

$$\mathbf{D}(x) = \mathbf{M} [\cosh(\gamma_i x)]_D \mathbf{M}^{-1} \quad (6.20)$$

onde,

- \mathbf{y} é a matriz de admitância *shunt* por unidade de comprimento da linha de transmissão;
- \mathbf{z} é a matriz de impedância serie por unidade de comprimento da linha de transmissão;
- \mathbf{M} são os autovetores de $\mathbf{P} = \mathbf{yz}$;
- γ_i é o autovalor correspondente ao i -ésimo autovetor de \mathbf{P}
- $[\cdot]_D$ notação para matriz diagonal.

Assim, por meio dessas constantes é possível obter as admitâncias primitivas *shunt* e série da linha de transmissão, em componentes de fase, conforme mostram (6.21) a (6.23).

$$\mathbf{Y}_{\text{shL}} = (\mathbf{D}(x) - \mathbf{I}) \mathbf{B}(x)^{-1} \quad (6.21)$$

$$\mathbf{Y}_{\text{shR}} = \mathbf{B}(x)^{-1} (\mathbf{A}(x) - \mathbf{I}) \quad (6.22)$$

$$\mathbf{Y}_{\text{LR}} = \mathbf{B}(x)^{-1} \quad (6.23)$$

onde,

- \mathbf{Y}_{shL} é a matriz das admitâncias primitivas *shunt* do lado do terminal local da linha;
- \mathbf{Y}_{shR} é a matriz das admitâncias primitivas *shunt* do lado do terminal remoto da linha;
- \mathbf{Y}_{LR} é a matriz das admitâncias primitivas série da linha;
- \mathbf{I} é a matriz identidade.

6.2.3 Transformadores

Os transformadores de potência trifásicos podem ser construídos com as bobinas das três fases dispostas sobre um mesmo núcleo ou construídos por meio de um banco de transformadores monofásicos.

Quanto ao núcleo, estes podem ser do tipo envolvente (em inglês: *shell*) ou envolvido (em inglês: *core*). O núcleo envolvente possui maior massa, porém esta desvantagem é superada pelo aumento da eficiência do transformador. Além disso, nos transformadores de núcleo envolvido o fluxo de dispersão é maior, produzindo maior reatância de dispersão e, no caso de curto-circuitos que envolvam a terra, o fluxo produzido por cada bobina é igual e possui a mesma direção, forçando o fluxo magnético resultante a passar pela carcaça (ou até mesmo fora dela, caso ela sature), reduzindo a impedância de sequência zero.

Em cada tipo de ligação, os transformadores trifásicos podem ser representados em componentes simétricas por três circuitos trifásicos equivalentes desacoplados entre si: um de sequência positiva, um de sequência negativa e um de sequência zero. Geralmente, os circuitos equivalentes apresentam as impedâncias em valores por unidade, fazendo com que a relação de transformação se torne unitária, facilitando a análise de redes elétricas equipadas com estes equipamentos.

Os circuitos equivalentes de sequência positiva e negativa, em valores por unidade, a menos da defasagem angular, são independentes do tipo de ligação. No entanto, o circuito equivalente de circuito zero é dependente da ligação. A Figura 19 mostra os circuitos equivalentes para cada tipo de ligação e para cada sequência.

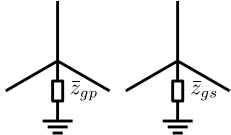
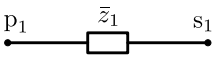
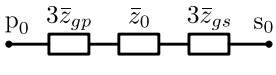
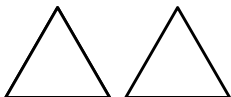
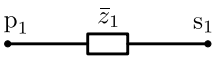
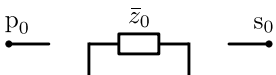
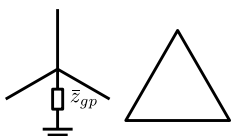
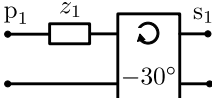
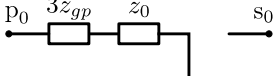
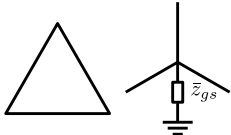
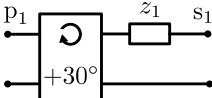
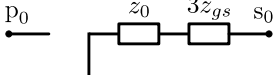
Ligação	Sequência positiva	Sequência zero
		
		
		
		
<p>Obs:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Para estrela solidamente aterrada ou isolada, faz-se, respectivamente, a impedância de aterramento igual a zero ou tendendo ao infinito. 2. Ângulo de -30° para ligação Yd1 e $+30^\circ$ para Dy11. 3. Para circuito equivalente de sequência negativa, inverter os ângulos dos defasores. 		

Figura 19 – Tipos de ligação dos transformadores trifásicos de dois enrolamentos e respectivos circuitos equivalentes em componentes simétricas.

Cada sequência pode ser representada, de forma geral, como um modelo π conforme ilustra a Figura 20 e, em seguida, cada tipo de ligação é obtida ao aplicar as devidas alterações, de forma que o circuito geral seja equivalente, em componentes simétricas, aos circuitos mostrados na Figura 19. As defasagens dos circuitos de sequência positiva e negativa, nos casos de ligação Y- Δ e Δ -Y foram desconsideradas, uma vez que não afetam o cálculo de curto-circuito.

A seguir, considerando-se transformadores de dois enrolamentos, para cada tipo de ligação são obtidas as matrizes de admitâncias primitivas em componentes de fase.

a) Ligação Y-Y

Para a ligação Y-Y, considerando o circuito geral ilustrado pela Figura 20, as admi-

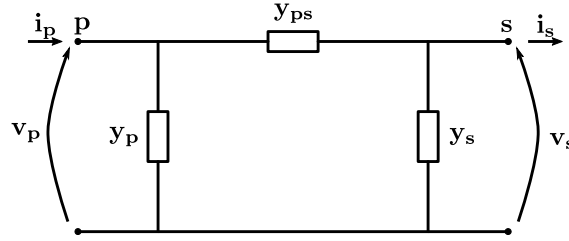


Figura 20 – Representação geral de transformadores utilizando o modelo π , em valores por unidade.

tâncias primitivas são:

$$\mathbf{y}_{ps} = \mathbf{T} \begin{bmatrix} 1/(3z_{gp} + z_0 + 3z_{gs}) & 0 & 0 \\ 0 & 1/z_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1/z_2 \end{bmatrix} \mathbf{T}^{-1} \quad (6.24)$$

$$\mathbf{y}_p = \mathbf{T} \begin{bmatrix} 10^{-6} & 0 & 0 \\ 0 & 10^{-6} & 0 \\ 0 & 0 & 10^{-6} \end{bmatrix} \mathbf{T}^{-1} \quad (6.25)$$

$$\mathbf{y}_s = \mathbf{T} \begin{bmatrix} 10^{-6} & 0 & 0 \\ 0 & 10^{-6} & 0 \\ 0 & 0 & 10^{-6} \end{bmatrix} \mathbf{T}^{-1} \quad (6.26)$$

Caso a ligação seja estrela solidamente aterrada, faz-se z_{gp} e/ou z_{gs} iguais a zero. Caso a ligação seja em estrela isolada, faz-se z_{gp} e/ou z_{gs} tender ao infinito (computacionalmente, pode ser adotado um valor relativamente muito maior que os valores típicos de impedância). Vale mencionar que, para evitar erros numéricos e matrizes mal-condicionadas, onde não há conexão é utilizado um valor de admitância tendendo a zero. No caso deste trabalho, utilizou-se o valor de 10^{-6} .

b) Ligação Δ - Δ

Para a ligação Δ - Δ , considerando o circuito geral ilustrado pela Figura 20, as admitâncias primitivas são:

$$\mathbf{y}_{ps} = \mathbf{T} \begin{bmatrix} 10^{-6} & 0 & 0 \\ 0 & 1/z_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1/z_2 \end{bmatrix} \mathbf{T}^{-1} \quad (6.27)$$

$$\mathbf{y}_p = \mathbf{T} \begin{bmatrix} 10^{-6} & 0 & 0 \\ 0 & 10^{-6} & 0 \\ 0 & 0 & 10^{-6} \end{bmatrix} \mathbf{T}^{-1} \quad (6.28)$$

$$\mathbf{y}_s = \mathbf{T} \begin{bmatrix} 10^{-6} & 0 & 0 \\ 0 & 10^{-6} & 0 \\ 0 & 0 & 10^{-6} \end{bmatrix} \mathbf{T}^{-1} \quad (6.29)$$

c) Ligação Y- Δ

Para a ligação Y- Δ , considerando o circuito geral ilustrado pela Figura 20, as admitâncias primitivas são:

$$\mathbf{y}_{ps} = \mathbf{T} \begin{bmatrix} 10^{-6} & 0 & 0 \\ 0 & 1/z_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1/z_2 \end{bmatrix} \mathbf{T}^{-1} \quad (6.30)$$

$$\mathbf{y}_p = \mathbf{T} \begin{bmatrix} 1/(3z_{gp} + z_0) & 0 & 0 \\ 0 & 10^{-6} & 0 \\ 0 & 0 & 10^{-6} \end{bmatrix} \mathbf{T}^{-1} \quad (6.31)$$

$$\mathbf{y}_s = \mathbf{T} \begin{bmatrix} 10^{-6} & 0 & 0 \\ 0 & 10^{-6} & 0 \\ 0 & 0 & 10^{-6} \end{bmatrix} \mathbf{T}^{-1} \quad (6.32)$$

d) Ligação Δ -Y

Para a ligação Δ -Y, considerando o circuito geral ilustrado pela Figura 20, as admitâncias primitivas são:

$$\mathbf{y}_{ps} = \mathbf{T} \begin{bmatrix} 10^{-6} & 0 & 0 \\ 0 & 1/z_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1/z_2 \end{bmatrix} \mathbf{T}^{-1} \quad (6.33)$$

$$\mathbf{y}_p = \mathbf{T} \begin{bmatrix} 10^{-6} & 0 & 0 \\ 0 & 10^{-6} & 0 \\ 0 & 0 & 10^{-6} \end{bmatrix} \mathbf{T}^{-1} \quad (6.34)$$

$$\mathbf{y}_s = \mathbf{T} \begin{bmatrix} 1/(z_0 + 3z_{gs}) & 0 & 0 \\ 0 & 10^{-6} & 0 \\ 0 & 0 & 10^{-6} \end{bmatrix} \mathbf{T}^{-1} \quad (6.35)$$

6.2.4 Compensação série

De maneira geral, a compensação série pode ser modelada matematicamente como uma impedância (GOLDSWORTHY, 1987). Desta forma, neste trabalho, a compensação foi modelada por meio de uma matriz de admitâncias primitivas, como indicado por (6.36) e ilustrado pela Figura 21. A admitância de cada fase pode assumir valor distinto

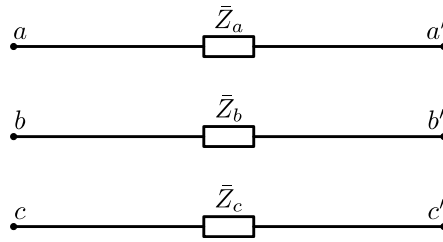


Figura 21 – Circuito equivalente para a compensação série.

das demais, dependendo do ponto de operação do MOV e da atuação da proteção da compensação série.

$$\mathbf{Y}_C = \begin{bmatrix} 1/\bar{Z}_a & 0 & 0 \\ 0 & 1/\bar{Z}_b & 0 \\ 0 & 0 & 1/\bar{Z}_c \end{bmatrix} \quad (6.36)$$

Ressalta-se que quando ocorre a atuação da proteção, a impedância da fase protegida deve assumir o valor nulo, porém foi considerado o valor mínimo de 10^{-6} para as impedâncias, evitando-se, assim, o surgimento de matrizes mal-condicionadas.

6.2.5 Banco de reatores *shunt*

Tipicamente, para evitar sobretensões nos terminais das linhas de transmissão quando ela está levemente carregada, é comum a instalação de banco de reatores *shunt* em seus terminais. Desta forma, o banco de reatores pode ser modelado como impedância constante por fase, onde (6.37) apresenta a matriz de admitâncias primitivas, em componentes de fase, do banco de reatores. A Figura 22 ilustra o modelo do banco de reatores.

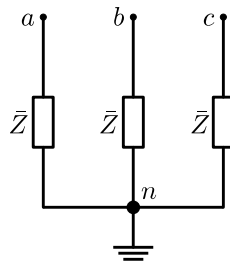


Figura 22 – Circuito equivalente para o banco de reatores.

$$\mathbf{Y}_L = \begin{bmatrix} 1/\bar{Z} & 0 & 0 \\ 0 & 1/\bar{Z} & 0 \\ 0 & 0 & 1/\bar{Z} \end{bmatrix} \quad (6.37)$$

6.2.6 Faltas

As faltas (ou curto-circuitos) que ocorrem nas linhas de transmissão podem ser classificadas em faltas fase-terra, fase-fase-terra, fase-fase e trifásicas. Desta forma, a matriz de admitâncias primitivas em componentes de fase, apresentada por (6.38), representa um modelo genérico de faltas. Fazendo-se algumas admitâncias nulas⁴, é possível representar qualquer um dos tipos citados. A Figura 23 ilustra o modelo da falta.

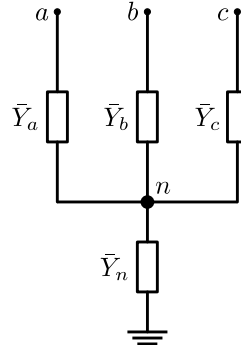


Figura 23 – Circuito equivalente para a falta.

$$\mathbf{Y}_F = \begin{bmatrix} \bar{Y}_a - \bar{Y}_a^2/\bar{Y}_t & -\bar{Y}_a\bar{Y}_b/\bar{Y}_t & -\bar{Y}_a\bar{Y}_c/\bar{Y}_t \\ -\bar{Y}_b\bar{Y}_a/\bar{Y}_t & \bar{Y}_b - \bar{Y}_b^2/\bar{Y}_t & -\bar{Y}_b\bar{Y}_c/\bar{Y}_t \\ -\bar{Y}_c\bar{Y}_a/\bar{Y}_t & -\bar{Y}_c\bar{Y}_b/\bar{Y}_t & \bar{Y}_c - \bar{Y}_c^2/\bar{Y}_t \end{bmatrix} \quad (6.38)$$

onde, $\bar{Y}_t = \bar{Y}_a + \bar{Y}_b + \bar{Y}_c + \bar{Y}_n$.

Como por exemplo, para uma falta fase-fase-terra se faz $\bar{Y}_c = 0$ em (6.38), resultando em:

$$\mathbf{Y}_F = \begin{bmatrix} \bar{Y}_a - \bar{Y}_a^2/\bar{Y}_t & -\bar{Y}_a\bar{Y}_b/\bar{Y}_t & 0 \\ -\bar{Y}_b\bar{Y}_a/\bar{Y}_t & \bar{Y}_b - \bar{Y}_b^2/\bar{Y}_t & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (6.39)$$

6.3 Localização da falta

O processo de localização da falta é realizado em duas etapas. A primeira etapa, descrita nos itens 6.3.1 ou 6.3.2, dependendo da localização da CS, é responsável pela preparação da rede para a localização da falta. Tal preparação consiste no ajuste das correntes dos equivalentes nos terminais da linha de transmissão e na inclusão da falta. Já a segunda etapa, descrita no item 6.3.3, é responsável pela localização da falta em si, por meio da minimização de uma função objetivo.

⁴ Para evitar matrizes mal-condicionadas foi adotado 10^{-6} como valor mínimo das admitâncias.

6.3.1 Preparação da rede para a localização da falta em linhas com compensação nos terminais

Para tornar claro o entendimento do processo de localização da falta em linhas com CS em um ou ambos os terminais, será considerada a rede elétrica ilustrada pela Figura 24. Esta rede, representada por seu diagrama unifilar, consiste em uma linha de transmissão com compensação série (Y_{CL} e Y_{CR}), reatores *shunt* (Y_{LL} e Y_{LR}) e equivalentes.

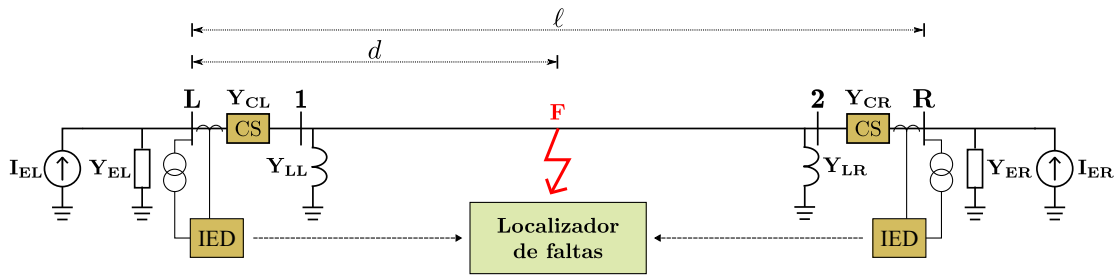


Figura 24 – Diagrama unifilar de uma rede elétrica genérica composta por uma linha de transmissão com CS em ambos os terminais, reatores e equivalentes. Os nós **L**, **1**, **2** e **R** representam nós trifásicos.

Após o tratamento dos sinais de tensão e corrente, adquiridos de oscilografias fornecidas pelos IEDs, o primeiro passo é determinar a corrente dos equivalentes conectados em ambos os terminais da linha de transmissão (considerando o equivalente de Norton). Desta forma, considerando conhecidos os fasores de tensão e corrente pré-falta nos terminais da linha e assumindo conhecidas as admitâncias dos equivalentes, Y_{EL} e Y_{ER} , é possível determinar as correntes dos equivalentes I_{EL} e I_{ER} . Tanto as admitâncias quanto as correntes dos equivalentes se mantêm constantes durante a condição pós-falta e são utilizados pelo processo de localização de faltas, descrito no item 6.3.3.

O segundo passo é dividir a linha de transmissão em dois trechos, com comprimentos d e $\ell - d$. Entre os trechos, o algoritmo cria um nó fictício **F**, conforme mostra a Figura 24 e detalhada pela Figura 25. As admitâncias dos novos trechos são dadas por (6.21) a (6.23), com os comprimentos inicialmente considerados como metade do comprimento total da linha. Assim, conecta-se o modelo da falta ao nó fictício, conforme (6.38), adaptado ao tipo de falta ocorrido⁵.

O terceiro passo é construir as equações nodais da rede elétrica. Como mencionado anteriormente, o método proposto utiliza a teoria dos grafos orientados para este fim. Desta forma, o método cria as matrizes de incidências e de admitâncias primitivas por

⁵ O tipo de falta é considerado conhecido a partir do dispositivo de proteção.

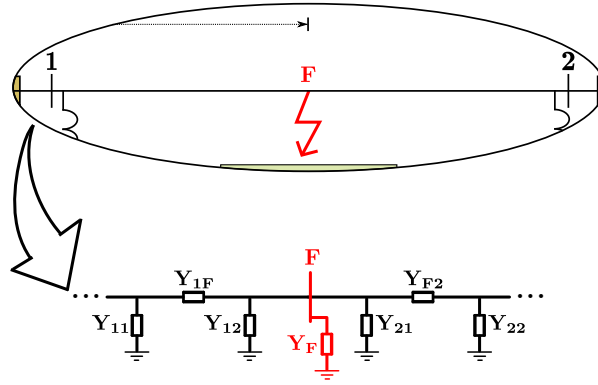


Figura 25 – Detalhe da linha de transmissão mostrada na Figura 24.

meio de (6.40) e (6.41).

$$\mathbf{Q} = \begin{matrix} & \text{L} & \text{1} & \text{2} & \text{R} & \text{F} \\ \mathbf{Y}_{\text{EL}} & \mathbf{I} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{Y}_{\text{CL}} & \mathbf{I} & -\mathbf{I} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \mathbf{Y}_{12} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ \mathbf{Y}_{\text{F2}} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{I} & \mathbf{0} & -\mathbf{I} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \mathbf{Y}_{\text{F}} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \mathbf{Y}_{\text{ER}} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{I} & \mathbf{0} \end{matrix} \quad (6.40)$$

$$\mathbf{Y}_{\text{pr}} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{\text{EL}} & \mathbf{0} & \dots & \dots & \dots & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \ddots & \ddots & & & \vdots \\ \vdots & \ddots & \mathbf{Y}_{12} & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \mathbf{Y}_{\text{F2}} & \ddots & \vdots \\ \vdots & & & \ddots & \ddots & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \dots & \dots & \dots & \mathbf{0} & \mathbf{Y}_{\text{ER}} \end{bmatrix} \quad (6.41)$$

Com as matrizes de incidências e primitivas, a matriz de admitâncias nodais é montada conforme (6.13). A matriz de admitâncias nodais é, então, utilizada pelo algoritmo de localização de faltas para resolver as equações nodais denotadas por (6.42), que têm como resultado as tensões nodais pós-falta $\mathbf{V}_{\text{L}}^{(c)}$ e $\mathbf{V}_{\text{R}}^{(c)}$ nos terminais da linha de transmissão.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{V}_L^{(c)} \\ \mathbf{V}_1^{(c)} \\ \mathbf{V}_2^{(c)} \\ \mathbf{V}_R^{(c)} \\ \mathbf{V}_F^{(c)} \end{bmatrix} = \mathbf{Y}_{\text{bus}}^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{EL} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{I}_{ER} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (6.42)$$

Com as correntes e admitâncias dos equivalentes, juntamente com as tensões pós-falta nos terminais da linha, calculam-se as correntes pós-falta, (6.43) e (6.44), que deixam os terminais da linha.

$$\mathbf{I}_L^{(c)} = \mathbf{I}_{EL} - \mathbf{Y}_{EL} \mathbf{V}_L^{(c)} \quad (6.43)$$

$$\mathbf{I}_R^{(c)} = \mathbf{I}_{ER} - \mathbf{Y}_{ER} \mathbf{V}_R^{(c)} \quad (6.44)$$

Nos casos de linhas com circuito duplo, o algoritmo proposto aplica o mesmo procedimento, porém considera as admitâncias do circuito paralelo e as admitâncias mútuas entre os circuitos na modelagem da linha.

6.3.2 Preparação da rede para a localização da falta em linhas com compensação ao longo de sua extensão

Nos casos onde a CS é instalada ao longo da linha de transmissão, como ilustrado pela Figura 26, os passos de preparação da rede elétrica são similares aos casos da instalação das CSs nos terminais da linha, conforme apresentado no item 6.3.1.

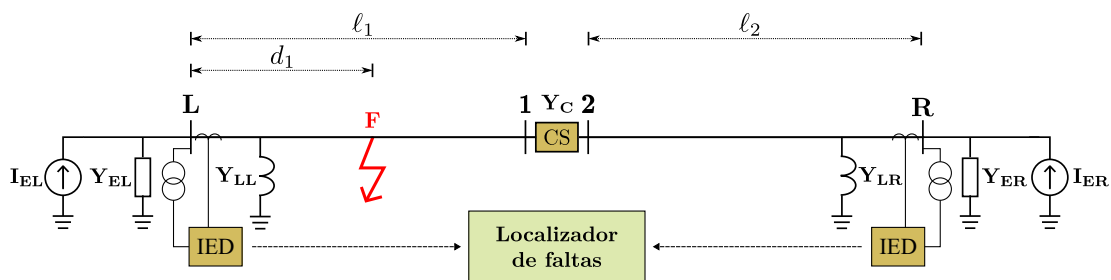


Figura 26 – Diagrama unifilar de uma rede elétrica genérica composta por uma linha de transmissão com CS ao longo de sua extensão, reatores e equivalentes. Os nós **L**, **1**, **2** e **R** representam nós trifásicos.

Desta forma, como no item 6.3.1, o primeiro passo consiste em determinar a corrente dos equivalentes conectados em ambos os terminais da linha de transmissão (considerando o equivalente de Norton). Desta forma, considerando conhecidos os fasores de tensão e corrente pré-falta nos terminais da linha e assumindo conhecidas as admitâncias dos equivalentes, \mathbf{Y}_{EL} e \mathbf{Y}_{ER} , é possível determinar as correntes dos equivalentes \mathbf{I}_{EL} e \mathbf{I}_{ER} .

Tanto as admitâncias quanto as correntes dos equivalentes se mantêm constantes durante a condição pós-falta e são utilizados pelo processo de localização de faltas, descrito no item 6.3.3.

A principal diferença na preparação da rede, em relação ao caso apresentado no item 6.3.1, está no segundo passo. Neste caso, a linha é tratada pelo algoritmo de localização de faltas como sendo duas linhas distintas ou porções. Assim, como será explicado no item 6.3.3.2, o erro de minimização da falta estar contida em cada porção da linha é comparado para a escolha da porção correta.

Para exemplificar, será considerada a análise da falta estar contida na porção à esquerda da CS, sendo o equacionamento da porção à direita similar. Assim, a porção à esquerda é dividida em dois trechos, com comprimentos d_1 e $\ell_1 - d_1$. Entre os trechos, o algoritmo cria um nó fictício **F**, conforme mostra a Figura 26 e detalhada pela Figura 27.

Como no caso do item 6.3.1, as admitâncias dos novos trechos são dadas por (6.21) a (6.23), com os comprimentos inicialmente considerados como metade do comprimento total da porção em análise. Assim, conecta-se o modelo da falta ao nó fictício, conforme (6.38), adaptado ao tipo de falta ocorrido⁶.

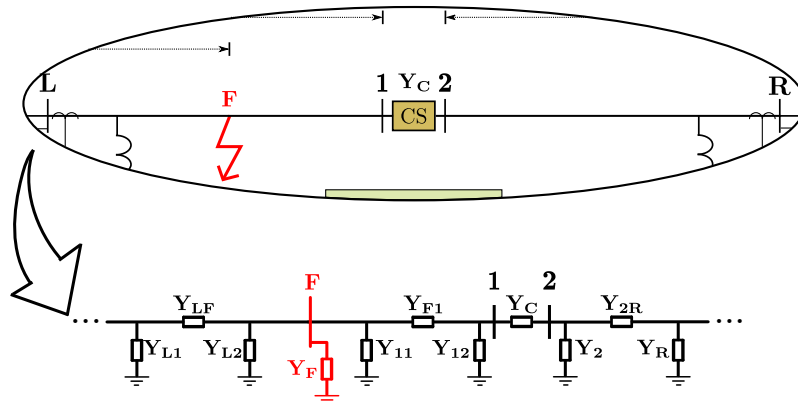


Figura 27 – Detalhe da linha de transmissão mostrada na Figura 26.

O terceiro passo é construir as equações nodais da rede elétrica. Como mencionado anteriormente, o método proposto utiliza a teoria dos grafos orientados para este fim. Desta forma, o método cria as matrizes de incidências e de admitâncias primitivas por

⁶ O tipo de falta é considerado conhecido a partir do dispositivo de proteção.

meio de (6.45) e (6.46), respectivamente.

$$\mathbf{Q} = \begin{matrix} & \mathbf{L} & \mathbf{1} & \mathbf{2} & \mathbf{R} & \mathbf{F} \\ \mathbf{Y}_{\mathbf{EL}} & \mathbf{I} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \mathbf{Y}_{\mathbf{L1}} & \mathbf{I} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \mathbf{Y}_{\mathbf{F}} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ \mathbf{Y}_{\mathbf{C}} & \mathbf{0} & -\mathbf{I} & \mathbf{I} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{Y}_{\mathbf{2R}} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & -\mathbf{I} & \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \mathbf{Y}_{\mathbf{ER}} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{I} & \mathbf{0} \end{matrix} \quad (6.45)$$

$$\mathbf{Y}_{\mathbf{pr}} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{\mathbf{EL}} & \mathbf{0} & \cdots & \cdots & \cdots & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \ddots & \ddots & & & \vdots \\ \vdots & \ddots & \mathbf{Y}_{\mathbf{F}} & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \mathbf{Y}_{\mathbf{C}} & \ddots & \vdots \\ \vdots & & & \ddots & \ddots & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \cdots & \cdots & \cdots & \mathbf{0} & \mathbf{Y}_{\mathbf{ER}} \end{bmatrix} \quad (6.46)$$

Da mesma forma como no caso anterior, com as matrizes de incidências e primitivas, a matriz de admitâncias nodais é montada conforme (6.13). A matriz de admitâncias nodais é, então, utilizada pelo algoritmo de localização de faltas para resolver as equações nodais denotadas por (6.42), que têm como resultado as tensões nodais pós-falta $\mathbf{V}_{\mathbf{L}}^{(c)}$ e $\mathbf{V}_{\mathbf{R}}^{(c)}$ nos terminais da linha de transmissão.

Com as correntes e admitâncias dos equivalentes, juntamente com as tensões pós-falta nos terminais da linha, calculam-se as correntes pós-falta, (6.43) e (6.44), que deixam os terminais da linha.

Como no caso anterior, no caso de linhas de circuito duplo, o algoritmo proposto aplica o mesmo procedimento, porém considera as admitâncias do circuito paralelo e as admitâncias mútuas entre os circuitos na modelagem da linha.

6.3.3 Processo de localização da falta

Os itens 6.3.3.1 e 6.3.3.2 apresentam, respectivamente, o processo de localização da falta para CS instaladas nos terminais da linha e ao longo da sua extensão.

6.3.3.1 Casos com a compensação série instalada nos terminais da linha de transmissão

Para encontrar o ponto de ocorrência da falta nos casos em que a CS se encontra nos terminais da linha de transmissão, conforme exemplificado no item 6.3.1, o método resolve o problema de minimização indicado em (6.47), requerendo como entradas: o tipo de falta e os fasores das tensões e das corrente medidas. Em (6.47), os fasores pós-falta medidos e calculados são denotados com os operadores $\cdot^{(m)}$ e $\cdot^{(c)}$, respectivamente.

$$\begin{aligned} & \text{Minimize } \varepsilon(d, r_{ph}, r_g, \bar{z}_{CLa}, \bar{z}_{CLb}, \bar{z}_{CLc}, \bar{z}_{CRa}, \bar{z}_{CRb}, \bar{z}_{CRc}), \\ & \text{sujeito a } \begin{cases} 10^{-6} \leq d/\ell \leq 1 \\ 10^{-6} \leq r_{ph}, r_g \leq 1 \\ 10^{-6} \leq \Re\{\bar{z}_{CLa}, \bar{z}_{CLb}, \bar{z}_{CLc}\} \leq 1 \\ 10^{-6} \leq \Im\{\bar{z}_{CLa}, \bar{z}_{CLb}, \bar{z}_{CLc}\} \leq 1 \\ 10^{-6} \leq \Re\{\bar{z}_{CRa}, \bar{z}_{CRb}, \bar{z}_{CRc}\} \leq 1 \\ 10^{-6} \leq \Im\{\bar{z}_{CRa}, \bar{z}_{CRb}, \bar{z}_{CRc}\} \leq 1 \end{cases} \end{aligned} \quad (6.47)$$

O objetivo do método é encontrar a distância de falta d a partir do terminal local da linha de transmissão, bem como as resistências de falta (r_{ph} entre fase e neutro, e r_g entre neutro e terra) e as impedâncias de fase dos compensadores série (\bar{z}_{CLa} , \bar{z}_{CLb} , \bar{z}_{CLc} , \bar{z}_{CRa} , \bar{z}_{CRb} e \bar{z}_{CRc}), todos como uma fração de seus valores limites:

- Distância de falta: ℓ ;
- Resistência de falta: 1000 $[\Omega]$;
- Parte real e imaginária da impedância do compensador série: valor nominal da reatância capacitiva.

Para atingir o objetivo, o algoritmo de otimização toma como entrada os limites inferior e superior das variáveis, cujos valores são, respectivamente, zeros e uns, uma vez que são divididos pelos seus valores limites. Com estes limites, conforme explicado no Capítulo 5 desta Tese, o algoritmo EDD busca minimizar o erro ε , dado por (6.48), gerando uma população de indivíduos que possuem valores das variáveis aleatoriamente distribuídos dentro dos limites estabelecidos.

Para cada indivíduo, o algoritmo de otimização EDD calcula o erro ε , onde \Re e \Im representam, respectivamente, as partes real e imaginária dos fasores, e \hat{v} , i representam suas componentes de fase $p = \{a, b, c\}$. No cálculo do erro, os fasores de tensão e corrente medidos e calculados nos terminais da linha são divididos por seus respectivos valores máximos absolutos, resultando em $\mathbf{v}_L^{(m)}$, $\mathbf{v}_L^{(c)}$, $\mathbf{v}_R^{(m)}$, $\mathbf{v}_R^{(c)}$, $\mathbf{i}_L^{(m)}$, $\mathbf{i}_L^{(c)}$, $\mathbf{i}_R^{(m)}$ e $\mathbf{i}_R^{(c)}$.

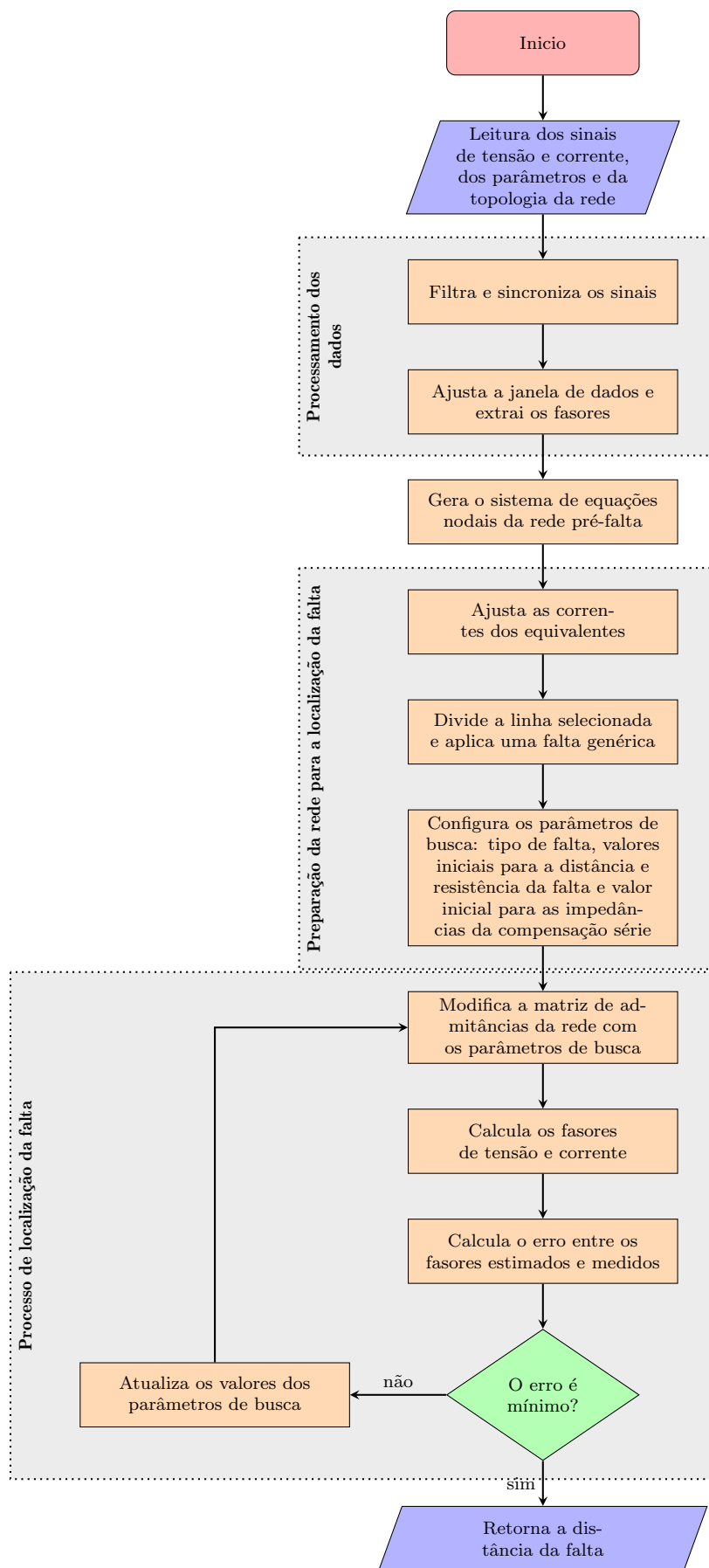


Figura 28 – Fluxograma da execução do método de localização de faltas para linhas de transmissão cuja compensação série está instalada nos terminais.

$$\begin{aligned}
\varepsilon(d, r_{ph}, r_g, \bar{z}_{CLa}, \bar{z}_{CLb}, \bar{z}_{CLc}, \bar{z}_{CRa}, \bar{z}_{CRb}, \bar{z}_{CRc}) = & \\
& \Re \left\{ \sum_{n=\{L,R\}} \sum_{p=\{a,b,c\}} \left(\dot{v}_{n,p}^{(\mathbf{m})} - \dot{v}_{n,p}^{(\mathbf{c})} \right) \right\} + \\
& \Im \left\{ \sum_{n=\{L,R\}} \sum_{p=\{a,b,c\}} \left(\dot{v}_{n,p}^{(\mathbf{m})} - \dot{v}_{n,p}^{(\mathbf{c})} \right) \right\} + \quad (6.48) \\
& \Re \left\{ \sum_{n=\{L,R\}} \sum_{p=\{a,b,c\}} \left(i_{n,p}^{(\mathbf{m})} - i_{n,p}^{(\mathbf{c})} \right) \right\} + \\
& \Im \left\{ \sum_{n=\{L,R\}} \sum_{p=\{a,b,c\}} \left(i_{n,p}^{(\mathbf{m})} - i_{n,p}^{(\mathbf{c})} \right) \right\}
\end{aligned}$$

Para obter os fasores de tensão e corrente pós-falta calculados, o algoritmo EDD chama uma função que altera a matriz de admitâncias nodais da rede, montada no processo de preparação da rede conforme o item 6.3.1, executando (6.40) e (6.41) e tendo como parâmetros os valores das variáveis do problema de minimização. Em seguida, a mesma função calcula os novos valores dos fasores por meio de (6.42) a (6.44).

O algoritmo EDD continua nesse processo até que uma condição de parada, conforme descrito no Capítulo 5, seja satisfeita, retornando os valores otimizados das variáveis que minimizam o erro ε , entre as quais está a melhor aproximação para a distância de falta d .

Para melhor entendimento, a Figura 28 ilustra o fluxograma do método de localização de faltas para casos cuja compensação série está instalada nos terminais da linha de transmissão.

6.3.3.2 Casos com a compensação série instalada ao longo da linha de transmissão

Nos casos em que a CS se encontra ao longo da linha, como no exemplo mostrado no item 6.3.2, o processo de localização da falta é similar ao apresentado no item 6.3.3.1, porém neste caso a linha é dividida em duas porções, uma à esquerda da CS e outra à direita.

Desta forma, o algoritmo de localização da falta resolve o problema de minimização (6.49), separadamente, para cada porção, obtendo um valor de erro de minimização da função objetivo (6.50) para cada uma, requerendo como entradas: o tipo de falta, a porção da linha a ser analisada e os fasores das tensões e das corrente medidas. A seguir, os fasores pós-falta medidos e calculados são denotados com os operadores $\cdot^{(\mathbf{m})}$ e $\cdot^{(\mathbf{c})}$,

respectivamente.

$$\begin{aligned} & \text{Minimize } \varepsilon_x(d_x, r_{ph}, r_g, \bar{z}_{CLa}, \bar{z}_{CLb}, \bar{z}_{CLc}), \\ & \text{sujeito a } \begin{cases} 10^{-6} \leq d_x/\ell_x \leq 1 \\ 10^{-6} \leq r_{ph}, r_g \leq 1 \\ 10^{-6} \leq \Re\{\bar{z}_{Ca}, \bar{z}_{Cb}, \bar{z}_{Cc}\} \leq 1 \\ 10^{-6} \leq \Im\{\bar{z}_{Ca}, \bar{z}_{Cb}, \bar{z}_{Cc}\} \leq 1 \end{cases} \end{aligned} \quad (6.49)$$

onde, $x = 1, 2$ denota a porção da linha em análise.

O objetivo do método é encontrar a distância de falta d_x , as resistências de falta (r_{ph} entre fase e neutro, e r_g entre neutro e terra) e as impedâncias de fase dos compensadores série (\bar{z}_{Ca} , \bar{z}_{Cb} , e \bar{z}_{Cc}), todos como uma fração de seus valores limites:

- Distância de falta - porção esquerda da linha: ℓ_1 ;
- Distância de falta - porção direita da linha: ℓ_2 ;
- Resistência de falta: 1000 $[\Omega]$;
- Parte real e imaginária da impedância do compensador série: valor nominal da reatância capacitiva.

Assim, o algoritmo de otimização EDD, da mesma forma como no item anterior, minimiza o erro ε_x , para cada porção, dado por (6.50), onde, também como no item anterior, os fasores de tensão e corrente medidos e calculados nos terminais da linha são divididos por seus respectivos valores máximos absolutos. Assim, o erro mínimo de cada porção da linha produz os valores otimizados para as variáveis, entre as quais está a melhor aproximação para a distância de falta.

$$\begin{aligned} \varepsilon_x(d_x, r_{ph}, r_g, \bar{z}_{Ca}, \bar{z}_{Cb}, \bar{z}_{Cc}) = & \\ & \Re \left\{ \sum_{n=\{L,R\}} \sum_{p=\{a,b,c\}} (\dot{v}_{n,p}^{(\mathbf{m})} - \dot{v}_{n,p}^{(\mathbf{c})}) \right\} + \\ & \Im \left\{ \sum_{n=\{L,R\}} \sum_{p=\{a,b,c\}} (\dot{v}_{n,p}^{(\mathbf{m})} - \dot{v}_{n,p}^{(\mathbf{c})}) \right\} + \\ & \Re \left\{ \sum_{n=\{L,R\}} \sum_{p=\{a,b,c\}} (\dot{i}_{n,p}^{(\mathbf{m})} - \dot{i}_{n,p}^{(\mathbf{c})}) \right\} + \\ & \Im \left\{ \sum_{n=\{L,R\}} \sum_{p=\{a,b,c\}} (\dot{i}_{n,p}^{(\mathbf{m})} - \dot{i}_{n,p}^{(\mathbf{c})}) \right\} \end{aligned} \quad (6.50)$$

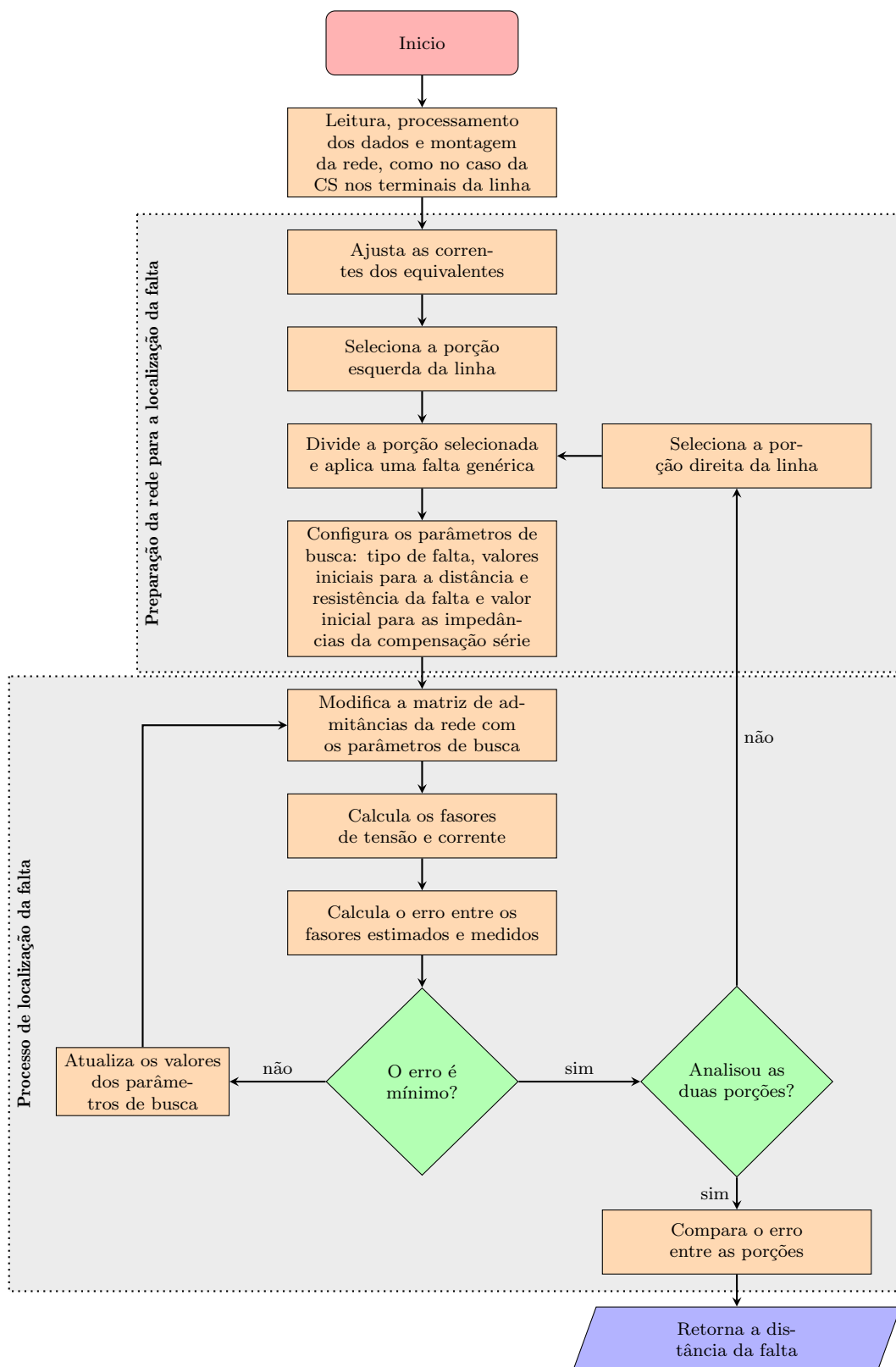


Figura 29 – Fluxograma da execução do método para o caso da CS em um ponto específico ao longo da linha

Por fim, o método compara os erros obtidos para cada porção da linha de transmissão, ε_1 e ε_2 . Caso $\varepsilon_1 < \varepsilon_2$, a falta se encontra na porção à esquerda da CS com distância d_1 do terminal local. Caso $\varepsilon_1 > \varepsilon_2$, a falta se encontra na porção à direita da CS com distância $\ell_1 + d_2$ do terminal local.

Para faltas diretamente localizadas no terminal esquerdo ou direito da CS, os erros ε_1 e ε_2 podem ser próximos ou até mesmo iguais. Portanto, nestas situações d_1 é igual a ℓ_1 , e d_2 é igual a zero. Portanto, nestes casos, a distância de falta é igual a ℓ_1 .

Para melhor entendimento, a Figura 29 ilustra o fluxograma do método de localização de faltas para casos cuja CS está instalada em um ponto específico ao longo da linha de transmissão.

Avaliação da metodologia proposta

7

Este capítulo apresenta os resultados da avaliação do método de localização de faltas proposto por meio da aplicação de faltas em uma linha de transmissão com compensação série de 500 [kV], onde foram variados o tipo, a resistência, a distância e o instante inicial das faltas.

O método foi testado em todos os casos a partir dos sinais de tensão e corrente oriundos das simulações, considerando a extração dos fasores tanto dos sinais pós-falta em regime permanente quanto no período transitório. Além disso, foi avaliado o desempenho do método em situações com erros nos fasores de tensão e corrente de ambos os terminais da linha de transmissão, nos parâmetros de ambos os circuitos da linha e nos equivalentes conectados aos terminais da linha.

Desta forma, o item 7.1 apresenta a descrição do sistema de transmissão simulado e o item 7.2, os resultados da avaliação do método.

7.1 Descrição do sistema de transmissão e dos casos de falta

Para a avaliação do método de localização de faltas, foram aplicados diversos casos de faltas no sistema de transmissão ilustrado pela Figura 30.

O sistema foi modelado no programa EMTP-ATP e é composto por uma linha de transmissão de 500 [kV] em 60 [Hz] com 256 [km] de comprimento. Ainda, a linha de transmissão possui circuito duplo e CS, além de Reatores *shunt* (RSs) em ambos os terminais. Esta é uma linha real que se estende da região Centro-Oeste à região Norte do Brasil.

Adicionalmente, foram representados, de forma genérica, os Disjuntores (DJs), os IEDs e os Transformadores de instrumentação (TIs) instalados nas subestações de ambos os terminais da linha de transmissão. Os Transformadores de corrente (TCs) possuem

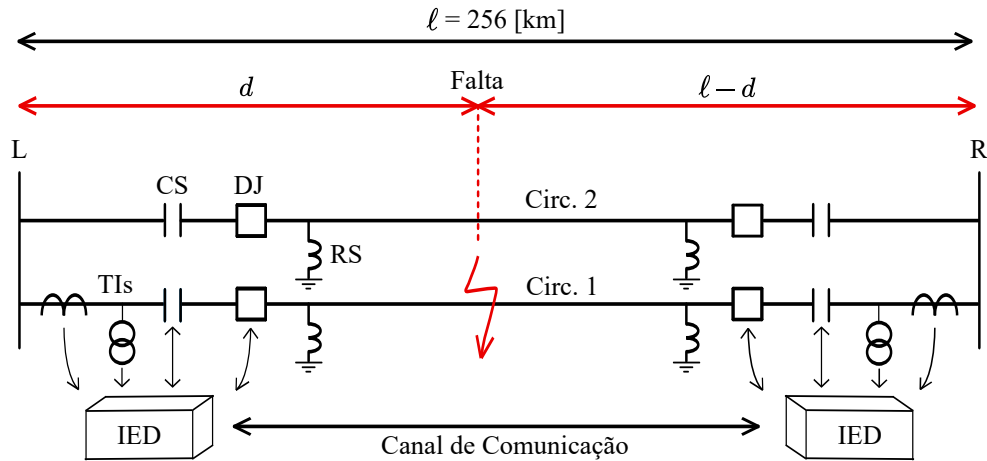


Figura 30 – Sistema de transmissão utilizado para avaliação do método.

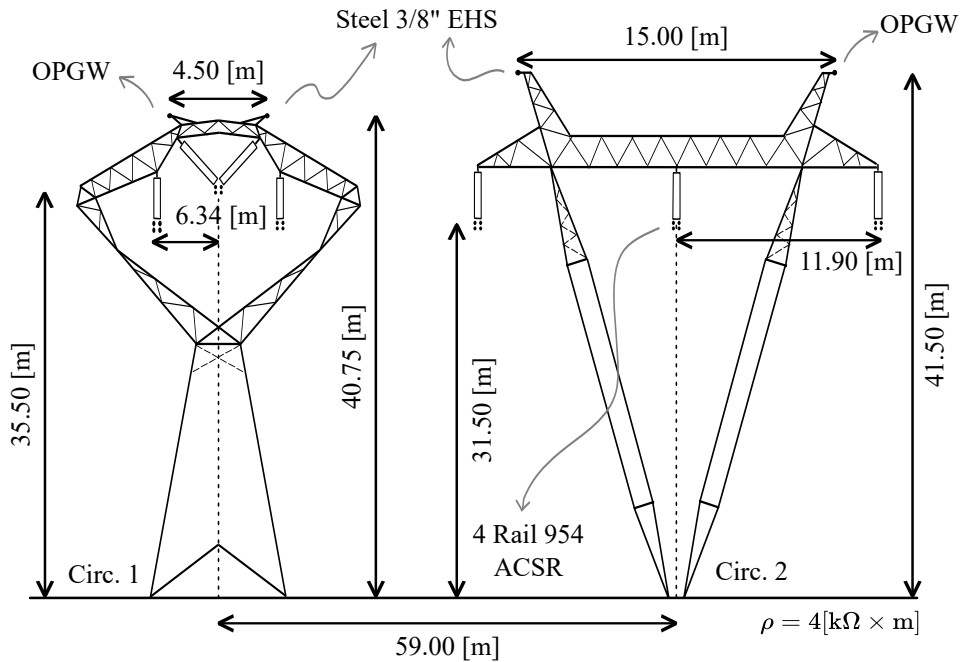


Figura 31 – Perfil das torres dos dois circuitos da linha de transmissão.

relação de transformação de 3000:1 e os Transformadores de potencial capacitivos (TPCs) relação de 500 [kV] para 115 [V].

A Figura 31 ilustra o perfil das torres de transmissão de ambos os circuitos. Os dados indicados na figura foram utilizados para o cálculo das parâmetros da linha.

O equivalente no terminal L possui impedâncias em componentes simétricas $\bar{Z}_{0L} = (0,67 + j14,07) [\Omega]$, $\bar{Z}_{1L} = (0,95 + j18,50) [\Omega]$ e fonte de tensão em sequência positiva com $575,0 \angle 40^\circ$ [kV]. O equivalente no terminal Remoto (R), por sua vez, possui impedâncias em componentes simétricas $\bar{Z}_{0R} = (17,43 + j79,71) [\Omega]$, $\bar{Z}_{1R} = (2,93 + j21,82) [\Omega]$ e fonte de tensão em sequência positiva com $556,5 \angle -13^\circ$ [kV]. Por fim, o equivalente de transferência, que se conecta entre os terminais L e R, possui impedância em componentes simétricas

$$\bar{Z}_{0LR} = (340,73 + j749,65) [\Omega], \bar{Z}_{1LR} = (6,44 + j36,40) [\Omega].$$

Os RSs em ambos os terminais da linha e em ambos os circuitos possuem potência reativa nominal de 59 [MVar]. Os CSs foram modelados de acordo com o modelo apresentado na Figura 32. Este modelo é baseado em um CSs existente e, desta forma, foi considerado no sistema de transmissão utilizado para avaliar o método proposto neste trabalho. Todas as análises do método foram realizadas com faltas aplicadas no circuito 1 da linha em questão.

As faltas foram modeladas conforme a Figura 23, com as admitâncias de falta contendo somente a parte real, ou seja, compostas somente pelo inverso das resistências de falta.

7.2 Resultados das simulações

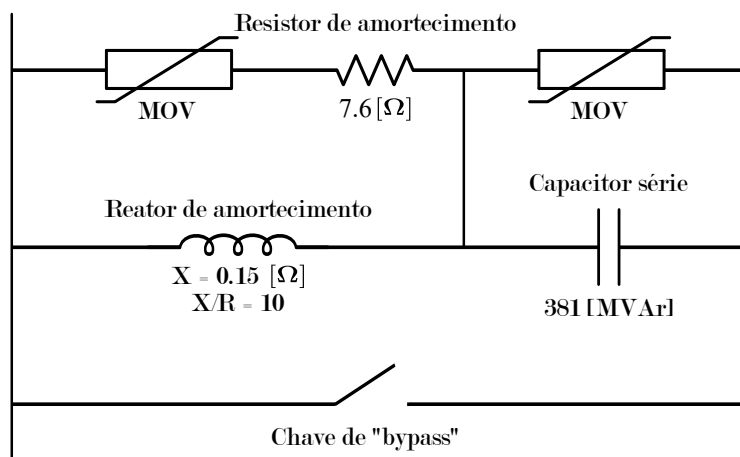
Esta seção apresenta os resultados da avaliação do método proposto. O item 7.2.1 apresenta os resultados da análise de precisão do método e o item 7.2.2, a análise de sensibilidade. No item 7.2.3 foi conduzida uma avaliação de desempenho do algoritmo de otimização utilizado neste trabalho, o EDD, frente a outros algoritmos disponíveis na literatura.

Na análise de precisão do método e na análise de sensibilidade, as condições de falta foram:

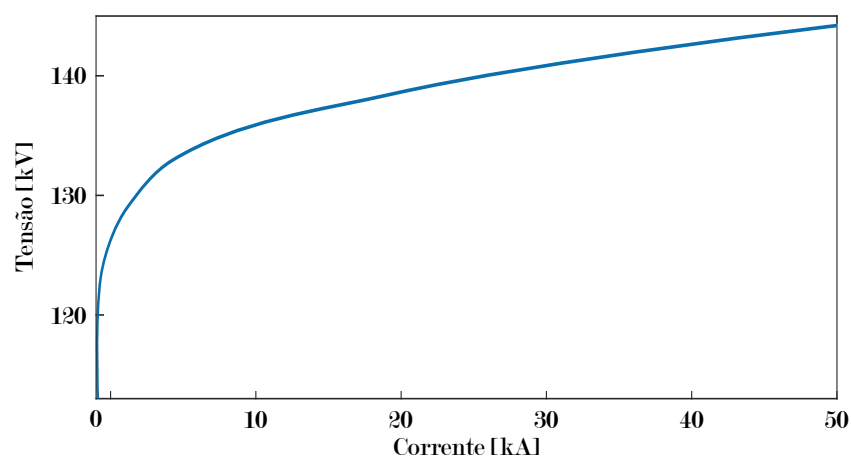
- Fasores extraídos dos sinais de tensão e corrente em regime permanente e no período transitório com faltas aplicadas nos instantes 0,2791 [s] e 0,2833 [s], instantes que causam, respectivamente, a menor e a maior assimetria nos sinais durante o período transitório;
- Distâncias de falta, em relação ao terminal L, de 2%, 10%, 30%, 50%, 70%, 90% e 98% do comprimento da linha de transmissão que possui 256 [km] de extensão;
- Tipos de falta: fase-terra (AT), dupla-fase-terra (BCT), dupla-fase (BC) e trifásica (ABCT);
- Resistências de falta, com valores combinados de resistências entre fase e neutro e entre neutro e terra. As combinações são, respectivamente: 1 (0,1;0,1), 2 (5;0,1), 3 (10;0,1), 4 (0,1;50), 5 (5;50), 6 (10;50), 7 (0,1;150), 8 (5;150), 9 (10;150), 10 (0,1;500), 11 (5;500) e 12 (10;500), com todos os valores em $[\Omega]$.

A análise de precisão foi realizada para todas as combinações de faltas originadas das condições supracitadas, totalizando 1008 simulações.

(a)



(b)



(c)

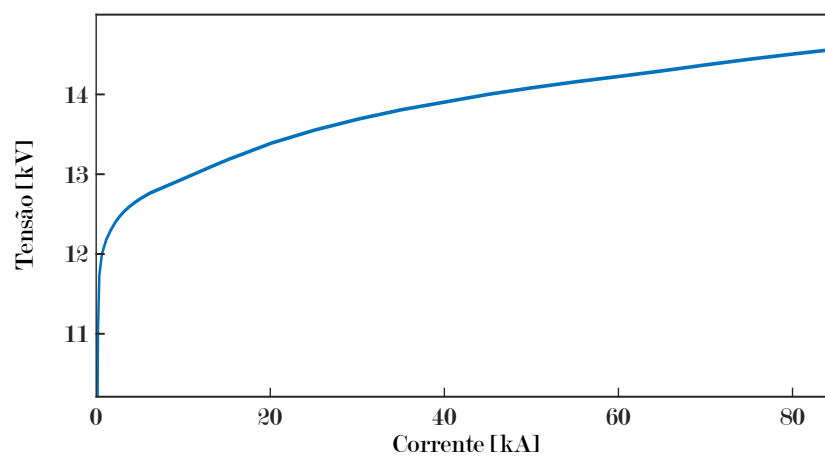


Figura 32 – Modelo da compensação série (a), curva do MOV em paralelo com o capacitor (b) e curva do MOV em paralelo com o reator de amortecimento (c).

A análise de sensibilidade foi realizada quanto à desvios nos fasores de tensão e corrente de ambos os terminais, nos parâmetros de ambos os circuitos da linha de transmissão e nas impedâncias dos equivalentes de ambos os terminais da linha.

Os desvios nos fasores foram gerados por meio da soma de um fasor de erro à estes, com distribuição normal, com magnitude média de 0,5% e desvio padrão de $\pm 0,25\%$. Para a fase do fasor de erro, foi considerada uma distribuição normal com média zero e desvio padrão de $\pm\pi$ [rad], conforme (IEEE, 2011). A análise foi conduzida aplicando erros aleatórios aos fasores de tensão e corrente de ambos os terminais da linha de transmissão, onde foram realizadas 50 simulações para cada tipo de falta (AT, BCT, BC e ABCT), à 50% do terminal local e com resistências na combinação 5 (5;50), totalizando 200 simulações. Os fasores foram extraídos de dados pós-falta em regime permanente.

A análise de sensibilidade a cerca de desvios nos parâmetros da linha de transmissão foi realizada aplicando erros com distribuição normal, média zero e desvio padrão de $\pm 5\%$ aos parâmetros longitudinais e transversais de ambos os circuitos da linha de transmissão. Como na análise de erros nos fasores, foram realizadas 50 simulações para cada tipo de falta sob as mesmas condições descritas anteriormente, também totalizando 200 simulações.

Finalmente, a análise de sensibilidade para desvios nas impedâncias dos equivalentes, conectados aos terminais da linha de transmissão, foi realizada aplicando erros com distribuição normal, média zero e desvio padrão de $\pm 5\%$ às partes real e imaginária das impedâncias de ambos os terminais. Como na análise de erros nos fasores e parâmetros, foram realizadas 50 simulações para cada tipo de falta sob as mesmas condições descritas anteriormente, também totalizando 200 simulações.

No caso da avaliação de desempenho dos algoritmos de otimização, foram realizadas diversas simulações para cada tipo de falta (AT, BCT, BC e ABCT) aplicadas no instante 0,2791 [s] à 50% (128 [km]) do terminal L, com resistências na combinação 5 (5;50) e fasores extraídos no período transitório pós-falta, totalizando 160 simulações.

Assim, considerando-se todos os casos, foram realizadas 1768 simulações para testes e análises do método proposto.

7.2.1 Análise de precisão

7.2.1.1 Variação da distância de falta

A Tabela 1 apresenta, para cada tipo de falta, os erros médios de localização obtidos para variações da distância, com fasores extraídos em regime permanente pós-falta. A Figura 33 ilustra tais informações. O maior erro médio foi de $0,065\% \pm 0,145\%$ para faltas fase-terra (AT) a 50% do terminal local da linha.

A Tabela 2 apresenta, e a Figura 34 ilustra, os erros de localização obtidos para

Tabela 1 – Erro médio da localização da falta para variação da distância de falta, com fasores extraídos em regime permanente pós-falta.

Tipo	AT		BCT		BC		ABCT	
Dist.	Erro médio	Desvio padrão	Erro médio	Desvio padrão	Erro médio	Desvio padrão	Erro médio	Desvio padrão
0,02	0,0016	0,0436	-0,0005	0,0057	-0,001	0,0045	0,0033	0,0058
0,1	0,0403	0,0491	0,0064	0,0086	0,0095	0,0072	0,0158	0,0037
0,3	0,0587	0,0768	-0,0079	0,0368	0,0118	0,0327	0,0278	0,031
0,5	0,0648	0,1453	-0,011	0,0512	-0,0067	0,0406	0,0034	0,0517
0,7	0,0184	0,0935	-0,0192	0,0133	-0,0201	0,0109	-0,0535	0,0229
0,9	-0,0534	0,0737	-0,0134	0,0097	-0,0095	0,0176	-0,0224	0,0065
0,98	-0,0023	0,0344	0,0014	0,0083	-0,0006	0,0102	-0,0049	0,0019

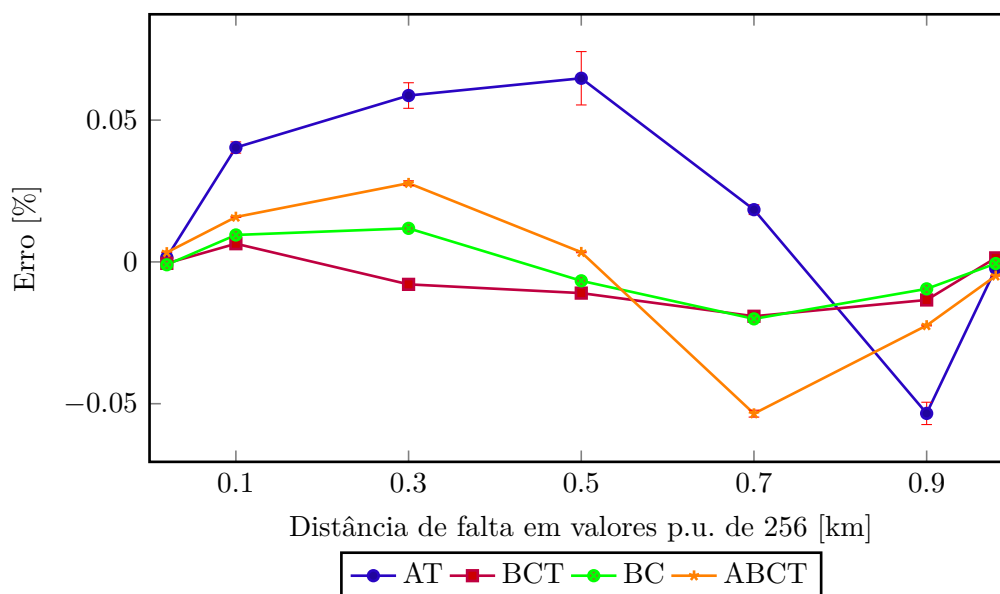


Figura 33 – Erro médio da localização da falta para variação da distância de falta, com fasores extraídos em regime permanente pós-falta.

variações da distância, considerando cada tipo de falta. As faltas foram aplicadas no instante 0,2791 [s], com fasores extraídos no período transitório pós-falta. O maior erro médio foi de 0,199% \pm 0,155% para faltas trifásicas (ABCT) a 10% do terminal local da linha. Diferentemente do caso anterior, os maiores erros médios ocorreram para faltas do tipo trifásico-terra.

A Tabela 3 apresenta, e a Figura 35 ilustra, os erros de localização obtidos para variações da distância, considerando cada tipo de falta. As faltas foram aplicadas no instante 0,2833 [s], com fasores extraídos no período transitório pós-falta. O maior erro médio foi de 0,451% \pm 0,138% para faltas fase-terra (AT) a 50% do terminal local da

Tabela 2 – Erro médio da localização da falta para variação da distância de falta. Falta aplicada em 0,2791 [s] com fasores extraídos no período transitório pós-falta.

Tipo	AT		BCT		BC		ABCT	
Dist.	Erro médio	Desvio padrão	Erro médio	Desvio padrão	Erro médio	Desvio padrão	Erro médio	Desvio padrão
0,02	0,167	0,365	-0,0236	0,0778	-0,0236	0,078	0,0996	0,0934
0,1	0,0193	0,3768	-0,0127	0,0837	-0,0128	0,0862	0,1985	0,1548
0,3	0,133	0,2045	0,1288	0,3426	0,0827	0,1921	0,0386	0,2288
0,5	-0,1691	0,3738	0,0972	0,239	0,0694	0,0684	0,0383	0,0335
0,7	-0,0703	0,6443	0,1015	0,1205	0,13	0,2359	0,0198	0,0581
0,9	0,1954	0,39	0,1039	0,2434	0,0852	0,2545	0,1546	0,1647
0,98	-0,0788	0,3185	0,1514	0,1056	0,1318	0,1234	0,0618	0,2252

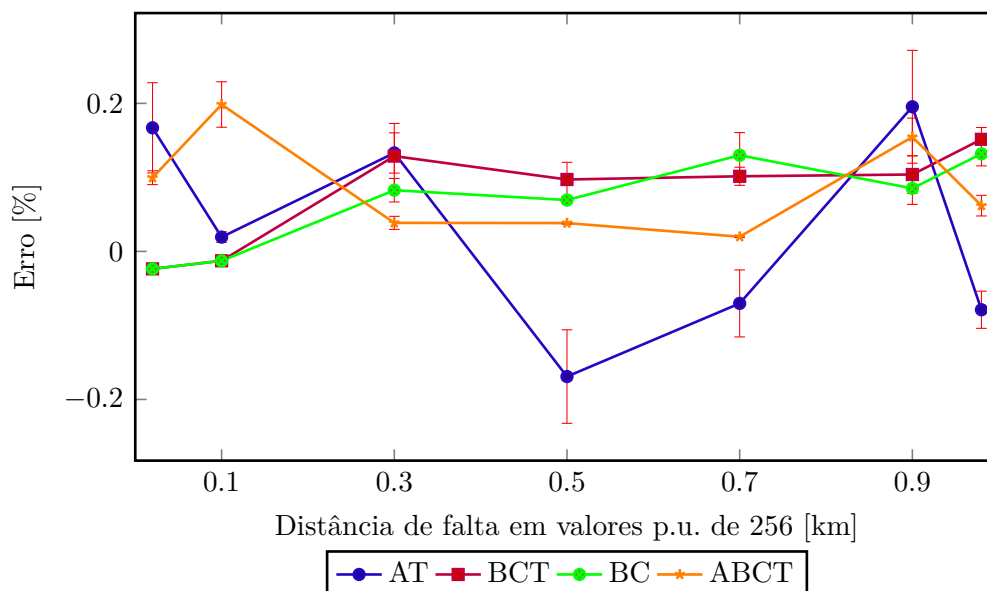


Figura 34 – Erro médio da localização da falta para variação da distância de falta. Falta aplicada em 0,2791 [s] com fasores extraídos no período transitório pós-falta.

linha.

7.2.1.2 Variação da resistência de falta

A Tabela 4 apresenta, para cada tipo de falta, os erros médios de localização obtidos para variações da resistência de falta, com fasores extraídos em regime permanente pós-falta. Tais informações são ilustradas pela Figura 36. O maior erro médio foi de $0,054\% \pm 0,184\%$ para faltas fase-terra (AT) na combinação 10 (0,1;500) de resistências de falta. Nota-se, ainda, que os maiores erros médios ocorreram para faltas do tipo fase-terra, uma vez que esta é a que mais sofre com imprecisões da componente de sequência zero.

Tabela 3 – Erro médio da localização da falta para variação da distância de falta. Falta aplicada em 0,2833 [s] com fasores extraídos no período transitório pós-falta.

Tipo	AT		BCT		BC		ABCT	
	Erro médio	Desvio padrão	Erro médio	Desvio padrão	Erro médio	Desvio padrão	Erro médio	Desvio padrão
0,02	0,0295	0,0999	0,2297	0,1794	0,2278	0,1729	0,0705	0,061
0,1	-0,1268	0,1704	0,0682	0,093	0,0601	0,0799	0,164	0,1109
0,3	-0,2594	0,1445	0,202	0,2775	0,2018	0,3104	0,1657	0,0917
0,5	0,4508	0,1377	0,0073	0,1401	0,1107	0,2763	0,0013	0,094
0,7	0,4237	0,4446	0,0858	0,2209	0,0129	0,0234	0,0502	0,0685
0,9	0,3229	0,3353	0,195	0,3655	0,2106	0,2974	0,2808	0,1944
0,98	0,0758	0,2683	0,1338	0,1534	0,1422	0,1998	8,33e-05	0,0324

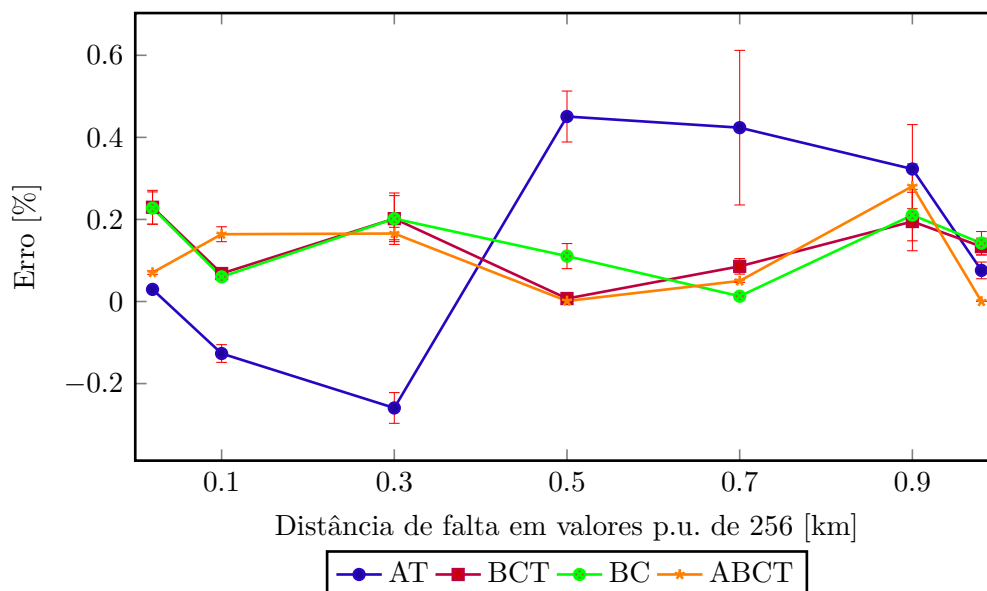


Figura 35 – Erro médio da localização da falta para variação da distância de falta. Falta aplicada em 0,2833 [s] com fasores extraídos no período transitório pós-falta.

A Tabela 5 apresenta, e a Figura 37 ilustra, os erros médios de localização obtidos para variações de resistência para cada tipo de falta, com fasores extraídos no período transitório pós-falta no instante 0,2791 [s]. O maior erro médio foi de 0,237% \pm 0,300% para faltas fase-terra (AT) na combinação 3 (10;0,1) de resistências de falta. Nota-se, ainda, que os maiores erros médios ocorreram para faltas do tipo fase-terra, uma vez que esta é a que mais sofre com imprecisões da componente de sequência zero.

A Tabela 6 apresenta, e a Figura 38 ilustra, os erros médios de localização obtidos para variações de resistência para cada tipo de falta, com fasores extraídos no período transitório pós-falta no instante 0,2833 [s]. O maior erro médio foi de 0,377% \pm 0,421%

Tabela 4 – Erro médio da localização da falta para variação da resistência de falta, com fasores extraídos em regime permanente pós-falta.

Tipo Dist.	AT		BCT		BC		ABCT	
	Erro médio	Desvio padrão	Erro médio	Desvio padrão	Erro médio	Desvio padrão	Erro médio	Desvio padrão
1	-0,0169	0,0307	-0,0049	0,0193	-0,0077	0,0177	-0,0083	0,0248
2	-0,0361	0,0687	-0,0014	0,0485	-0,0024	0,0429	-0,0154	0,0308
3	0,0247	0,0942	-0,0021	0,0207	0,0004	0,0196	-0,0031	0,016
4	0,01757	0,0582	-0,0021	0,0135	-0,0009	0,0151	-0,0113	0,0267
5	0,0227	0,0809	-0,0064	0,0163	-0,0026	0,0214	0,0099	0,0433
6	-0,0334	0,1365	-0,0101	0,0466	0,0029	0,0152	-0,0063	0,0456
7	0,0269	0,0494	-0,0123	0,0192	-0,0053	0,0165	-0,014	0,0383
8	0,0359	0,0589	-0,0019	0,02	-0,0021	0,0204	0,0071	0,0447
9	0,0231	0,0365	-0,0186	0,0388	-0,0037	0,0469	-0,011	0,027
10	0,054	0,1844	-0,0064	0,0099	-0,0059	0,0116	-0,0009	0,0427
11	0,0537	0,0724	-0,0026	0,0169	0,001	0,0171	0,006	0,035
12	0,04726	0,0613	-0,0069	0,0181	-0,002	0,0257	-0,005	0,0419

para faltas fase-terra (AT) na combinação 12 (10;500) de resistências de falta. Nota-se, ainda, que os maiores erros médios ocorreram para faltas do tipo fase-terra, uma vez que esta é a que mais sofre com imprecisões da componente de sequência zero.

7.2.1.3 Comentários adicionais

As Figuras 33 a 38 apresentaram os erros percentuais de localização das faltas, em relação ao tamanho da linha ($\ell = 256$ [km]), calculados para diversas distâncias e resistências de falta, utilizando dados pós-falta tanto em regime permanente quanto no período transitório.

De acordo com os resultados obtidos, nota-se que o algoritmo proposto consegue localizar qualquer tipo de falta com precisão, com os maiores erros médios na faixa de 0,054% a 0,451%.

As faltas fase-terra foram as que apresentaram os maiores erros, sendo que, para os fasores extraídos em regime permanente, o maior erro foi de 0,451% para uma falta fase-terra à 50% do terminal L na combinação 10 (0,1;500) de resistências de falta. Já para os casos em que os fasores foram extraídos no período transitório, com instante de falta em 0,2791 [s], o maior erro encontrado foi de 1,002%, para uma falta fase-terra à 70% do terminal L na combinação 7 (0,1;150) de resistências de falta. Por fim, ainda considerando

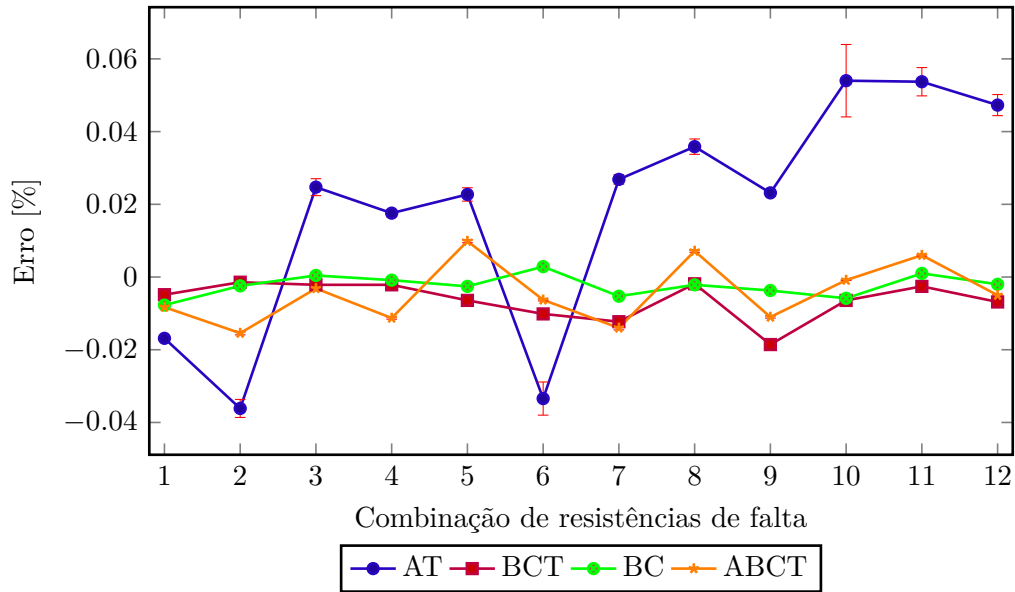


Figura 36 – Erro médio da localização da falta para variação da resistência de falta, com fasores extraídos em regime permanente pós-falta.

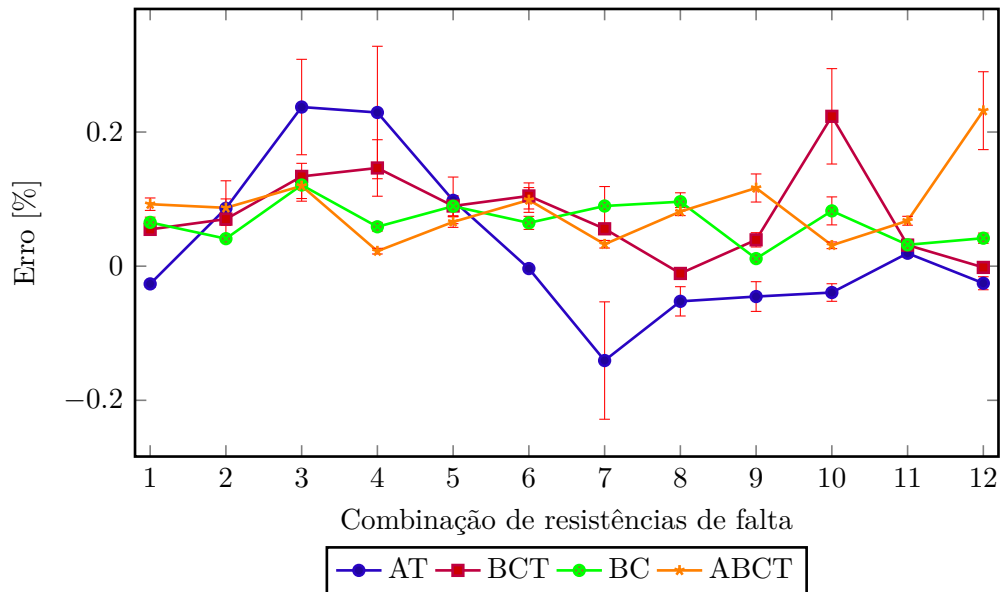


Figura 37 – Erro médio da localização da falta para variação da resistência de falta. Falta aplicada em 0,2791 [s] com fasores extraídos no período transitório pós-falta.

os casos dos fasores extraídos no período transitório, porém com instante de falta em 0,2833 [s], o maior erro encontrado foi de 1,019%, para uma falta fase-terra à 70% do terminal L na combinação 9 (10;150) de resistências de falta.

Nota-se, que os maiores erros, independentemente da condição de falta, ocorreram para faltas fase-terra, com alta impedância e entre 50% e 70% do comprimento total da linha (com referência ao terminal L).

No caso dos dados pós-falta em regime permanente, observa-se que resistências de

Tabela 5 – Erro médio da localização da falta para variação da resistência de falta. Falta aplicada em 0,2791 [s] com fasores extraídos no período transitório pós-falta.

Tipo	AT		BCT		BC		ABCT	
	Erro médio	Desvio padrão	Erro médio	Desvio padrão	Erro médio	Desvio padrão	Erro médio	Desvio padrão
1	-0,0264	0,1959	0,0549	0,1171	0,0653	0,1192	0,0924	0,1003
2	0,0863	0,4755	0,0701	0,1349	0,041	0,094	0,087	0,1526
3	0,2373	0,2998	0,1339	0,1457	0,121	0,1667	0,1197	0,1905
4	0,2291	0,431	0,1464	0,2877	0,0587	0,1116	0,0224	0,1889
5	0,0981	0,3541	0,0897	0,1615	0,0894	0,177	0,066	0,1229
6	-0,0036	0,5562	0,1047	0,1856	0,0646	0,1509	0,0987	0,187
7	-0,1407	0,622	0,0557	0,1464	0,0897	0,3233	0,0327	0,1732
8	-0,0524	0,4166	-0,0109	0,2518	0,0961	0,138	0,0814	0,074
9	-0,0453	0,489	0,0393	0,2717	0,0113	0,14	0,1166	0,1796
10	-0,0393	0,3332	0,2234	0,3183	0,0824	0,2532	0,0311	0,1601
11	0,0193	0,3163	0,0314	0,1679	0,0319	0,1606	0,0677	0,098
12	-0,0254	0,3824	-0,0019	0,1193	0,0417	0,1825	0,2319	0,2504

falta elevadas levam à maiores erros de localização, porém com todos os erros satisfatoriamente baixos. Já no caso das medições pós-falta em período transitório, conforme o esperado, o algoritmo proposto apresentou erros de localização maiores em comparação às medições em regime permanente. Ainda assim, deve-se notar que mesmo com dados transitórios, o método proposto se mostrou bastante preciso e robusto.

7.2.2 Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade foi conduzida para avaliar a robustez do método, testando-o frente à casos à desvios na extração dos fasores de tensão e corrente, nos parâmetros da linha de transmissão e nos equivalentes dos terminais. Os itens a seguir apresentam tal análise.

7.2.2.1 Erros na extração de fasores

A análise estatística foi realizada com aplicação de erros aos fasores de tensão e corrente de ambos os terminais da linha de transmissão, para faltas à 50% do terminal local com resistências na combinação 5 (5;50), considerando todos os tipos de falta (AT, BCT, BC e ABCT) e com os fasores extraídos em regime permanente. Para cada tipo de falta foram realizadas 50 simulações, conforme mencionado no início deste capítulo.

Tabela 6 – Erro médio da localização da falta para variação da resistência de falta. Falhas aplicadas em 0,2833 [s] com fasores extraídos no período transitório pós-falta.

Tipo	AT		BCT		BC		ABCT	
	Erro médio	Desvio padrão	Erro médio	Desvio padrão	Erro médio	Desvio padrão	Erro médio	Desvio padrão
1	-0,0793	0,1751	0,0424	0,209	0,108	0,1215	0,0637	0,0927
2	0,1181	0,2857	0,0583	0,314	0,0681	0,1646	0,0986	0,1768
3	0,035	0,273	0,1473	0,23	0,2169	0,3656	0,1551	0,1787
4	0,0103	0,2171	0,1513	0,1778	0,1996	0,2932	0,086	0,137
5	0,028	0,2519	0,1427	0,1899	0,1109	0,2218	0,0909	0,0823
6	-0,0084	0,3696	0,1867	0,2311	0,217	0,2672	0,135	0,2497
7	0,1309	0,3184	0,1246	0,1645	0,032	0,1997	0,0809	0,1205
8	0,115	0,4159	0,1603	0,1846	0,1753	0,1958	0,0933	0,0782
9	0,1719	0,4344	0,1113	0,1964	0,1056	0,179	0,1217	0,1236
10	0,3754	0,4491	0,1984	0,3057	0,1067	0,1099	0,1104	0,1065
11	0,2976	0,44	0,2313	0,2707	0,2389	0,3156	0,0834	0,0843
12	0,3769	0,4211	0,0254	0,2755	0,0771	0,1881	0,1366	0,2126

As Figuras 39 a 42 apresentam os histogramas normalizados em densidades de probabilidades, juntamente com as curvas de densidade de probabilidades e um diagrama de caixa, dos erros da distância da falta para faltas dos tipos AT, BCT, BC e ABCT. Ainda, a Tabela 7 apresenta um resumo dos resultados obtidos da análise de sensibilidade.

Como se pode observar, tanto na tabela como nas figuras, os maiores erros aconteceram para faltas do tipo fase-terra (AT) e trifásicas (ABCT), sendo esta última a que apresentou os maiores erros (erro médio de -0,2254% com desvio padrão de 0,7076% e limites inferior e superior de -1,5622% e 1,1149%, respectivamente).

Nota-se que o menor erro médio da análise de sensibilidade, considerando erros nos fasores, ocorreu para as faltas BCT, apresentando erro médio de -0,0068% com desvio padrão de 0,2014% e limites inferior e superior de -0,357% e 0,3315%, respectivamente.

Em geral, de acordo com os resultados, os erros foram baixos e evidencia a robustez do método para erros nos fasores. Ressalta-se que os erros foram aplicados aleatoriamente aos fasores de forma independente, ou seja, cada fasor de tensão e corrente de ambos os terminais da linha de transmissão sofreram variações distintas entre si, podendo gerar condições com erros na localização de faltas maiores do que os erros aplicados individualmente.

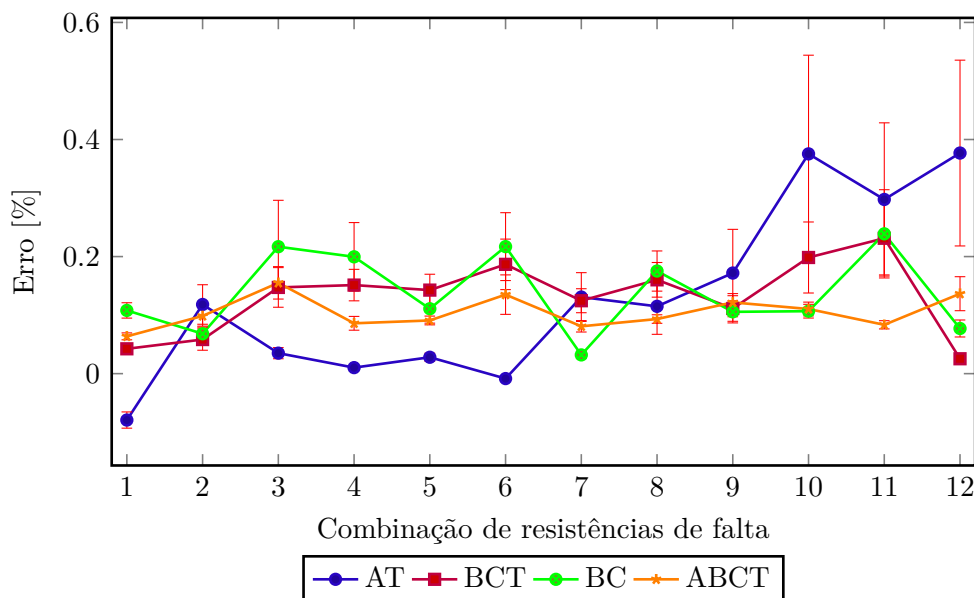


Figura 38 – Erro médio da localização da falta para variação da resistência de falta. Falta aplicada em 0,2833 [s] com fasores extraídos no período transitório pós-falta.

Tabela 7 – Erros na determinação da distância de falta considerando erros nos fasores. Falta à 50% (128 [km]) do terminal local, com resistências na combinação 5 (5;50) e com os fasores extraídos em regime permanente. Todos os valores em (%).

Tipo	Erro médio	Desvio padrão	Limite inf.	Perc. 25	Mediana	Perc. 75	Limite sup.	Outlier inf.	Outlier sup.
AT	-0,1043	0,5994	-1,1394	-0,5193	-0,1363	0,2438	1,0305	-	1,5185
BCT	-0,0068	0,2014	-0,3570	-0,1519	0,0073	0,1347	0,3315	-	-
BC	-0,0268	0,2281	-0,5430	-0,1488	-0,0321	0,1508	0,3781	-0,6063	-
ABCT	-0,2254	0,7076	-1,5622	-0,7438	-0,1524	0,3885	1,1149	-	-

7.2.2.2 Erros nos parâmetros da linha de transmissão

A análise estatística foi realizada com aplicação de erros aos parâmetros longitudinais e transversais de ambos os circuitos da linha de transmissão. Como no caso anterior, a análise foi realizada aplicando faltas à 50% do terminal local com resistências na combinação 5 (5;50), considerando todos os tipos de falta (AT, BCT, BC e ABCT) e com os fasores extraídos em regime permanente. Para cada tipo de falta foram realizadas 50 simulações, conforme mencionado no início deste capítulo.

As Figuras 43 a 46 apresentam os histogramas normalizados em densidades de probabilidades, juntamente com as curvas de densidade de probabilidades e um diagrama de caixa, dos erros da distância da falta para faltas dos tipos AT, BCT, BC e ABCT. Ainda, a Tabela 8 apresenta um resumo dos resultados obtidos da análise de sensibilidade.

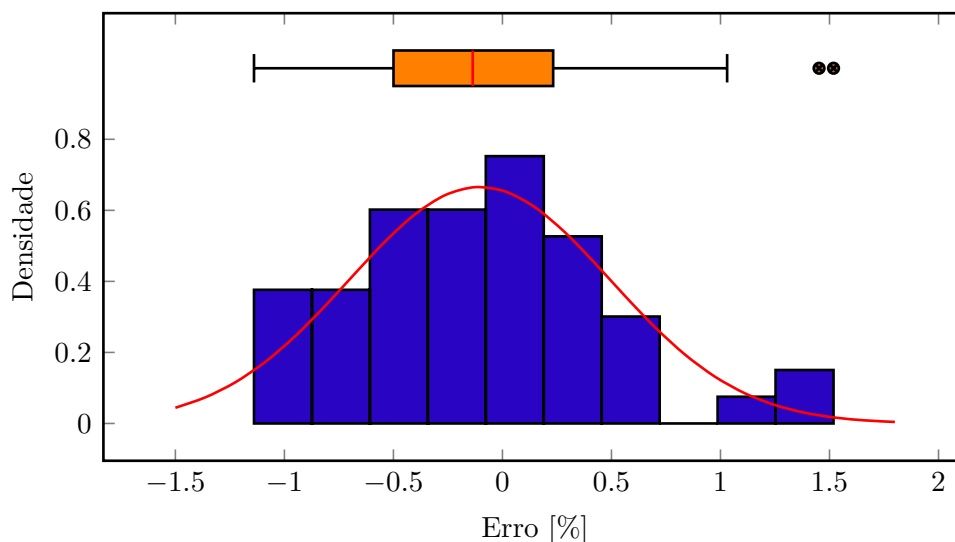


Figura 39 – Erros da distância de falta para faltas do tipo AT, com erros nos fasores, à 50% do terminal local, com resistências na combinação 5 (5;50) e com os fasores extraídos em regime permanente.

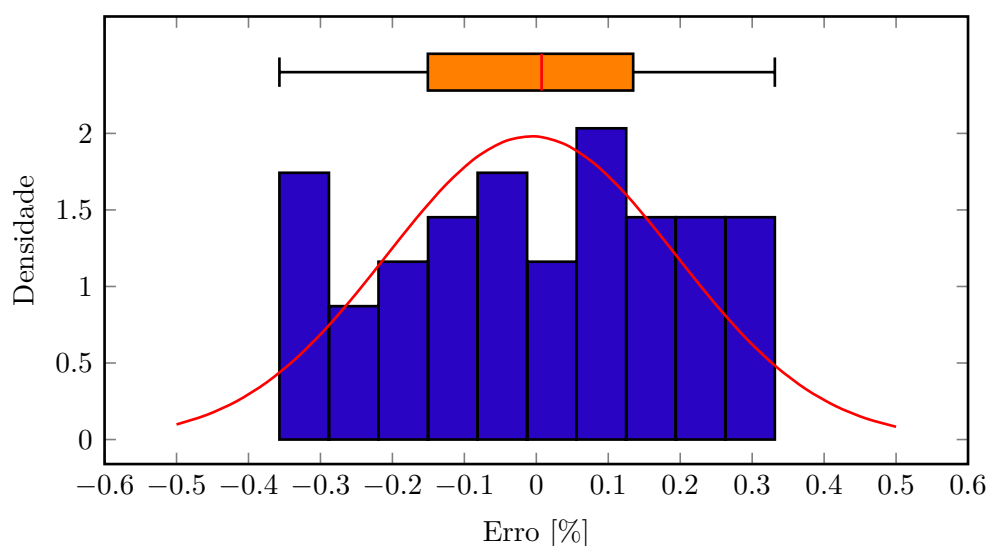


Figura 40 – Erros da distância de falta para faltas do tipo BCT, com erros nos fasores, à 50% do terminal local, com resistências na combinação 5 (5;50) e com os fasores extraídos em regime permanente.

Como se pode observar, tanto na tabela como nas figuras, os erros apresentaram aproximadamente o mesmo comportamento para todos os tipos de falta. Considerando o erro médio como parâmetro de comparação entre os tipos de falta, as faltas do tipo BC foram as que apresentaram os maiores erros, com erro médio de -0,8854%. Porém, considerando os limites como parâmetro de comparação, as faltas AT foram as que apresentaram os maiores erros, com erro no limite inferior de -4,9284%.

Nota-se que o menor erro médio da análise de sensibilidade, considerando erros nos parâmetros da linha de transmissão, ocorreu para as faltas BCT, apresentando erro

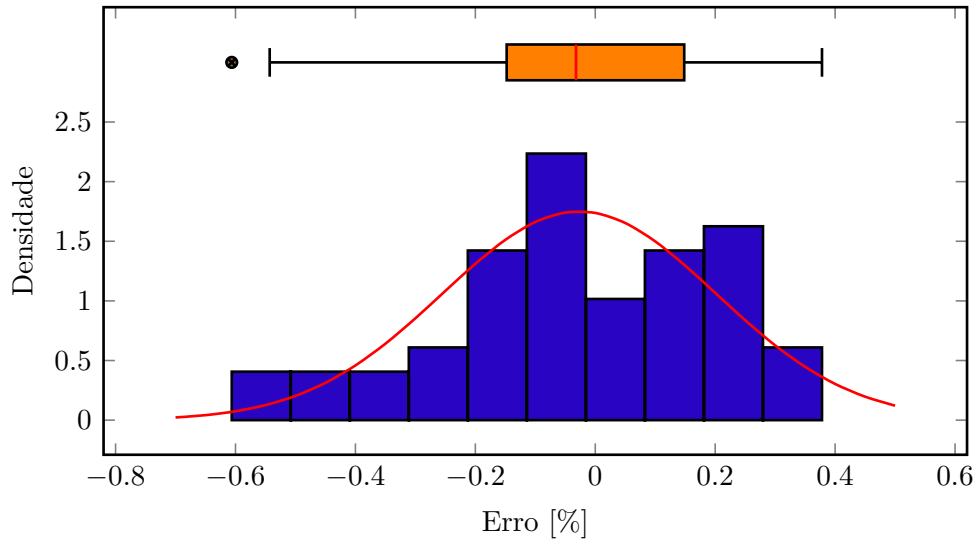


Figura 41 – Erros da distância de falta para faltas do tipo BC, com erros nos fasores, à 50% do terminal local, com resistências na combinação 5 (5;50) e com os fasores extraídos em regime permanente.

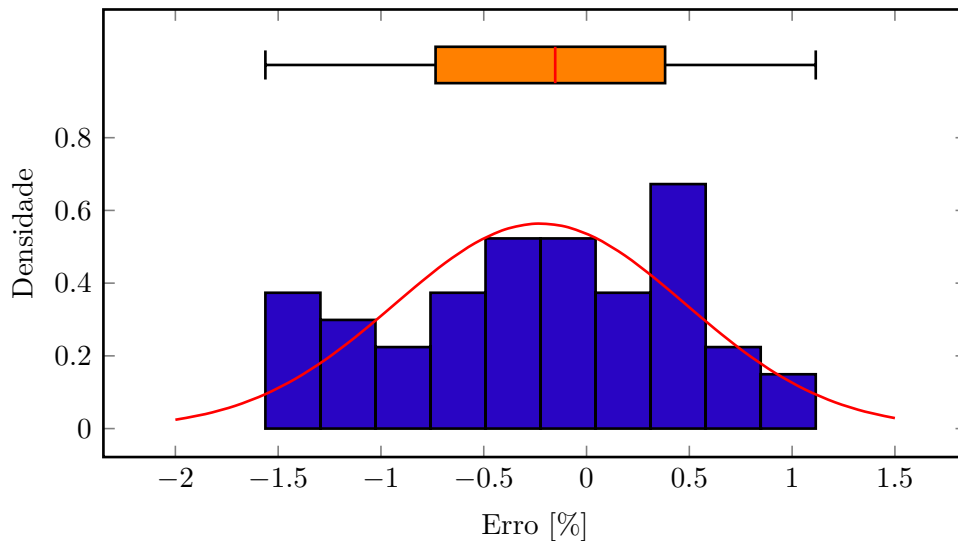


Figura 42 – Erros da distância de falta para faltas do tipo ABCT, com erros nos fasores, à 50% do terminal local, com resistências na combinação 5 (5;50) e com os fasores extraídos em regime permanente.

médio de $-0,0377\%$ com desvio padrão de $2,1834\%$ e limites inferior e superior de $-4,0961\%$ e $4,3183\%$, respectivamente.

Em geral, de acordo com os resultados, os erros de estimativa da distância das faltas seguiram o nível de erros aplicados aos parâmetros da linha de transmissão, neste caso de $\pm 5\%$. Este comportamento ocorre devido ao prolongamento ou encurtamento aparente da linha de transmissão. No entanto, em casos reais, os parâmetros de sequência positiva possuem maior precisão, uma vez que estes não dependem da resistividade do solo, cujo valor pode variar ao longo da linha devido às condições do solo, sendo, desta

forma, os parâmetros de sequência zero os mais afetados.

Tabela 8 – Erros na determinação da distância de falta considerando erros nos parâmetros. Falta à 50% (128 [km]) do terminal local, com resistências na combinação 5 (5;50) e com os fasores extraídos em regime permanente. Todos os valores em (%).

Tipo	Erro médio	Desvio padrão	Limite inf.	Perc. 25	Mediana	Perc. 75	Limite sup.	Outlier inf.	Outlier sup.
AT	-0,6423	2,0866	-4,9284	-1,6435	-0,5771	0,7942	3,4980	-	-
BCT	-0,0377	2,1834	-4,0961	-1,7197	0,3227	1,1457	4,3183	-	-
BC	-0,8854	2,1056	-4,6281	-2,6003	-1,1202	0,4358	3,4725	-	-
ABCT	0,2926	2,6384	-4,5246	-2,0547	-0,6935	2,4866	4,7946	-	-

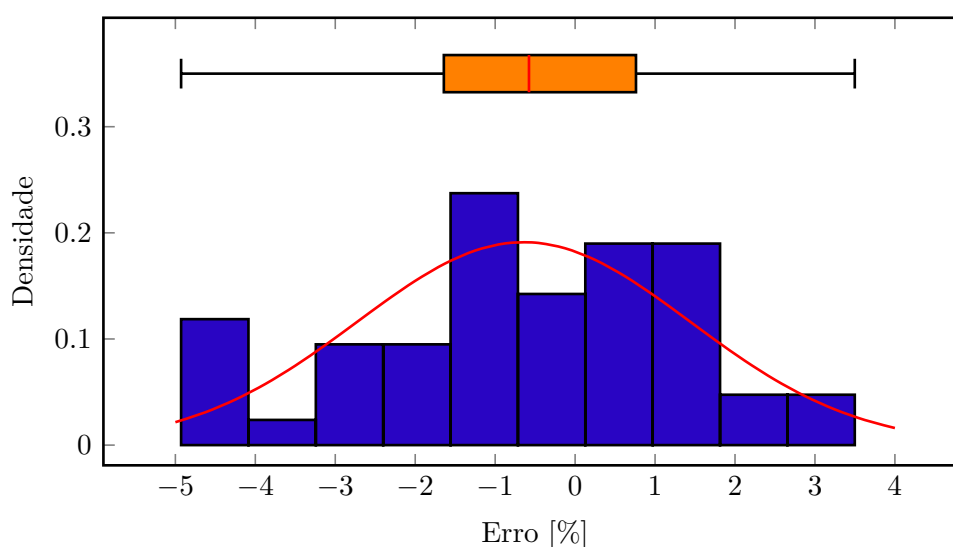


Figura 43 – Erros da distância de falta para faltas do tipo AT, com erros nos parâmetros da linha, à 50% do terminal local, com resistências na combinação 5 (5;50) e com os fasores extraídos em regime permanente.

7.2.2.3 Erros nos equivalentes dos terminais e de transferência

A análise estatística foi realizada com aplicação de erros nas impedâncias dos equivalentes conectados aos terminais da linha de transmissão e à impedância do equivalente de transferência entre os terminais. Como nos casos anteriores, a análise foi realizada aplicando faltas à 50% do terminal local com resistências na combinação 5 (5;50), considerando todos os tipos de falta (AT, BCT, BC e ABCT) e com os fasores extraídos em regime permanente. Para cada tipo de falta foram realizadas 50 simulações, conforme mencionado no início deste capítulo.

As Figuras 47 a 50 apresentam os histogramas normalizados em densidades de probabilidades, juntamente com as curvas de densidade de probabilidades e um diagrama

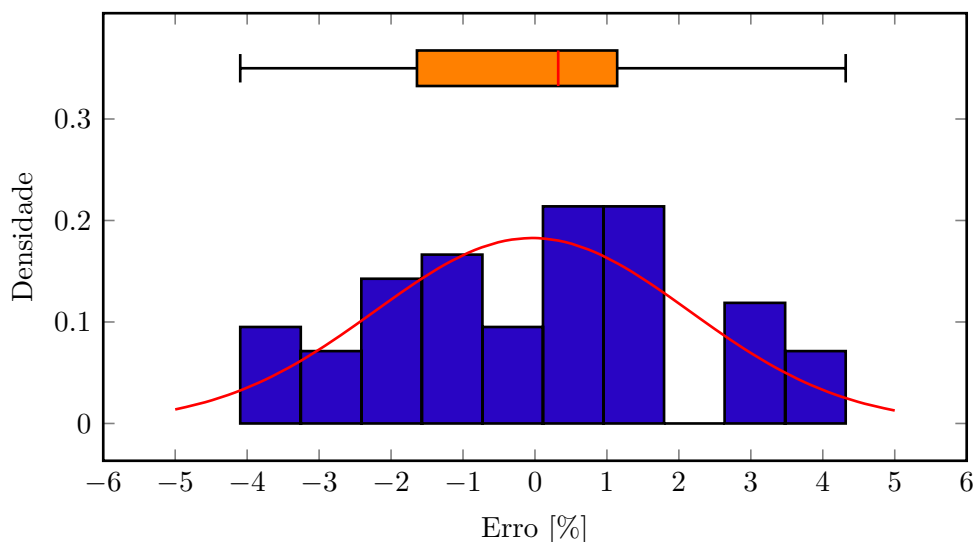


Figura 44 – Erros da distância de falta para faltas do tipo BCT, com erros nos parâmetros da linha, à 50% do terminal local, com resistências na combinação 5 (5;50) e com os fasores extraídos em regime permanente.

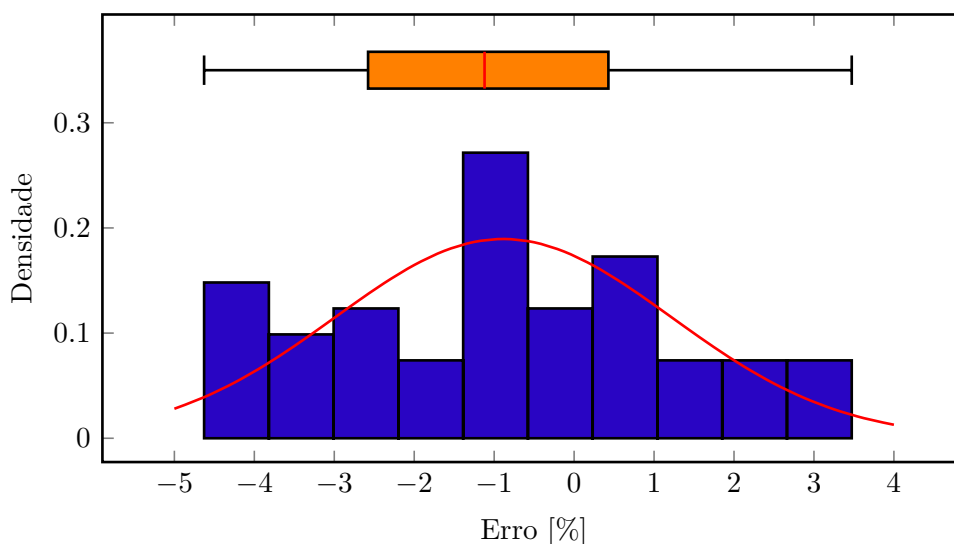


Figura 45 – Erros da distância de falta para faltas do tipo BC, com erros nos parâmetros da linha, à 50% do terminal local, com resistências na combinação 5 (5;50) e com os fasores extraídos em regime permanente.

de caixa, dos erros da distância da falta para faltas dos tipos AT, BCT, BC e ABCT. Ainda, a Tabela 9 apresenta um resumo dos resultados obtidos da análise de sensibilidade.

Como se pode observar, tanto na tabela como nas figuras, os maiores erros aconteceram para faltas do tipo fase-terra (AT) e trifásicas (ABCT), sendo esta última a que apresentou os maiores erros (erro médio de -0,4259% com desvio padrão de 0,2555% e limites inferior e superior de -0,8839% e -0,0064%, respectivamente). As faltas BCT e BC apresentaram erros limites de aproximadamente -0,1%, mostrando que estes tipos de faltas são pouco sensíveis à erros nos equivalentes.

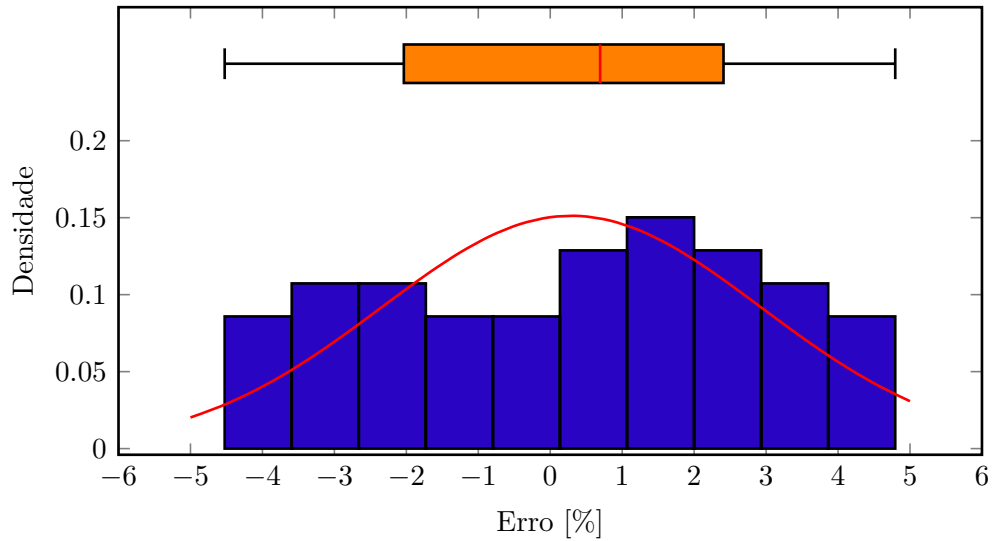


Figura 46 – Erros da distância de falta para faltas do tipo ABCT, com erros nos parâmetros da linha, à 50% do terminal local, com resistências na combinação 5 (5;50) e com os fasores extraídos em regime permanente.

Em geral, de acordo com os resultados, os erros foram baixos e evidencia a robustez do método para erros nos equivalentes.

Tabela 9 – Erros na determinação da distância de falta considerando erros nos equivalentes. Faltas à 50% (128 [km]) do terminal local, com resistências na combinação 5 (5;50) e com os fasores extraídos em regime permanente. Todos os valores em (%).

Tipo	Erro médio	Desvio padrão	Limite inf.	Perc. 25	Mediana	Perc. 75	Limite sup.	Outlier inf.	Outlier sup.
AT	-0,0490	0,1993	-0,4837	-0,1938	-0,0382	0,0818	0,4030	-	-
BCT	-0,0314	0,0316	-0,1057	-0,0576	-0,0326	-0,0084	0,0248	-	-
BC	-0,0232	0,0400	-0,1046	-0,0502	-0,0285	0,0009	0,0720	-	-
ABCT	-0,4259	0,2555	-0,8839	-0,6581	-0,4595	-0,2051	-0,0064	-	-

7.2.2.4 Comentários adicionais

As Figuras 39 a 50, juntamente com as Tabelas 7 a 9 apresentam os resultados da análise de sensibilidade do método de localização de faltas proposto, por meio da aplicação de erros aos fasores de tensão e corrente, aos parâmetros da linha de transmissão e aos equivalentes conectados aos terminais da linha e entre estes (equivalente de transferência). Os resultados são os erros percentuais na determinação da distância de falta, em relação ao tamanho da linha ($\ell = 256$ [km]).

Em geral, as faltas do tipo fase-terra (AT) e trifásica (ABCT) foram as que apresentaram os maiores erros. Para o tipo de falta fase-terra, considerando-se os percentis

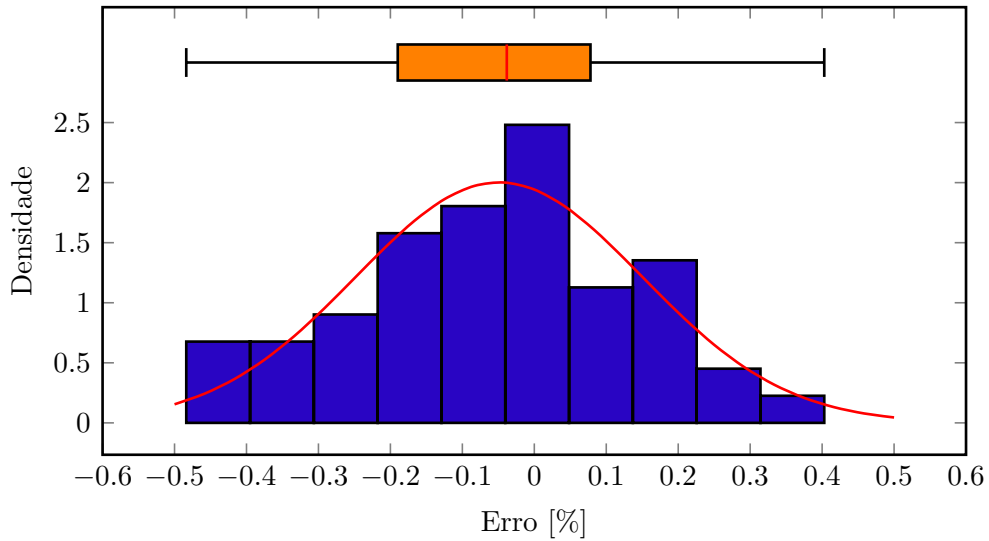


Figura 47 – Erros da distância de falta para faltas do tipo AT, com erros nos equivalentes, à 50% do terminal local, com resistências na combinação 5 (5;50) e com os fasores extraídos em regime permanente.

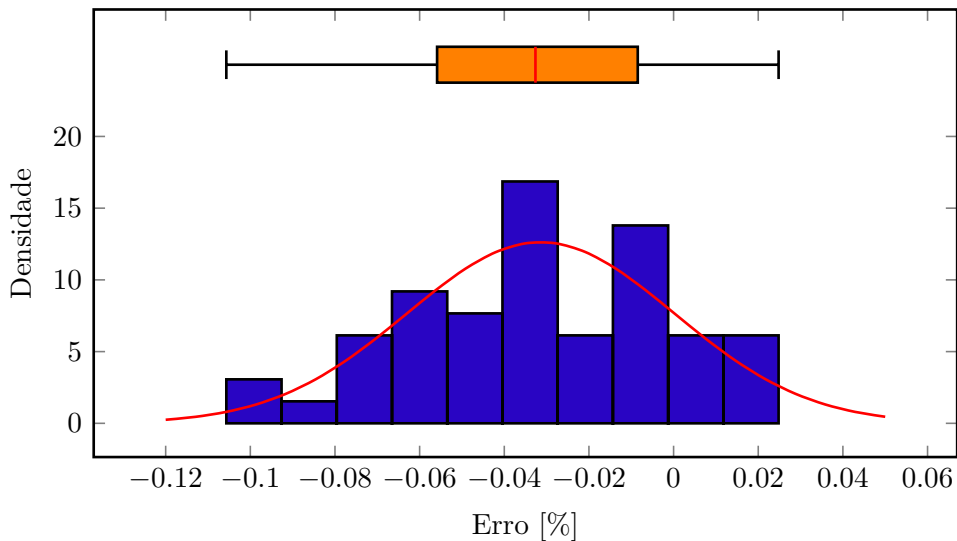


Figura 48 – Erros da distância de falta para faltas do tipo BCT, com erros nos equivalentes da linha, à 50% do terminal local, com resistências na combinação 5 (5;50) e com os fasores extraídos em regime permanente.

25 e 75, respectivamente, os erros ficaram entre -0,5193% e 0,2438% para desvios nos fasores, entre -1,6435% e 0,7942% para desvios nos parâmetros e entre -0,1938% e 0,0818% para desvios nos equivalentes. Já para o tipo trifásico, ainda considerando os percentis 25 e 75, respectivamente, os erros ficaram entre -0,7438% e 0,3885% para desvios nos fasores, entre -2,0547% e 2,4866% para desvios nos parâmetros e entre -0,6581% e -0,2051% para desvios nos equivalentes.

De acordo com os resultados obtidos, nota-se que o método é robusto aos desvios que possam estar presentes nos fasores, nos parâmetros e nos equivalentes. Contudo, sua

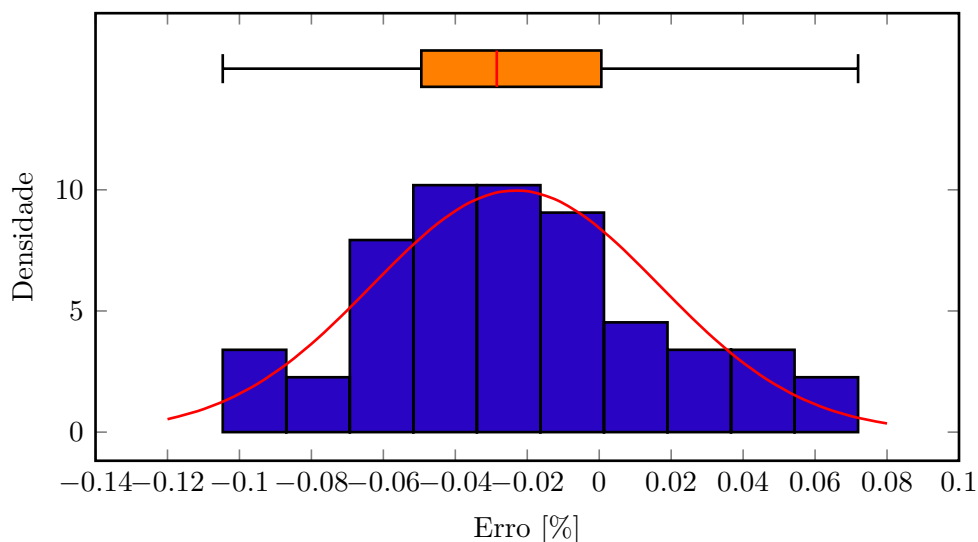


Figura 49 – Erros da distância de falta para faltas do tipo BC, com erros nos equivalentes da linha, à 50% do terminal local, com resistências na combinação 5 (5;50) e com os fasores extraídos em regime permanente.

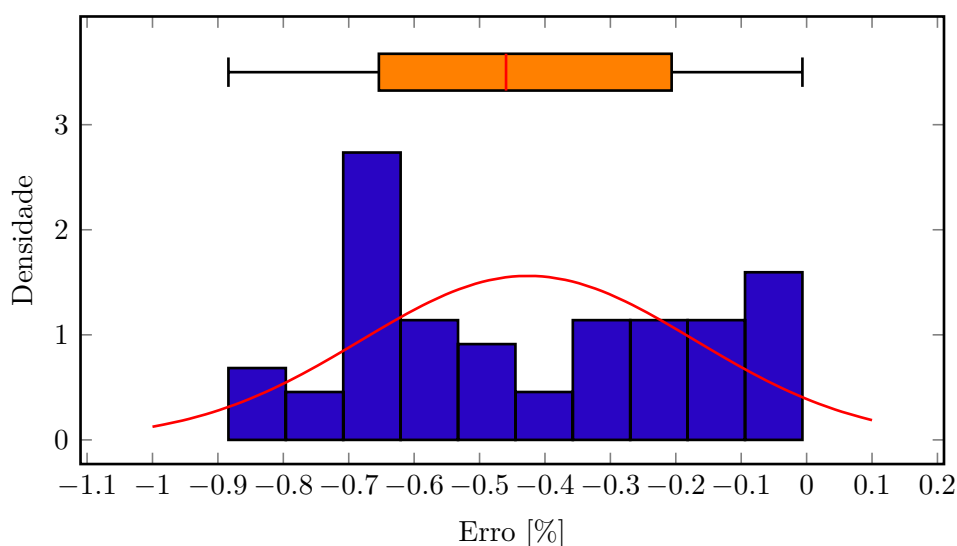


Figura 50 – Erros da distância de falta para faltas do tipo ABCT, com erros nos equivalentes da linha, à 50% do terminal local, com resistências na combinação 5 (5;50) e com os fasores extraídos em regime permanente.

precisão tende a ser melhor quanto maior for a qualidade destas informações. Dentre estas grandezas, os parâmetros da linha são os de maior atenção, uma vez que os erros na determinação da distância da falta podem apresentar os mesmos níveis de erro que os parâmetros possam conter.

7.2.3 Análise dos algoritmos de otimização

Diversas simulações foram realizadas empregando os algoritmos de otimização mencionados no Capítulo 5: PS, SA e AG, com o objetivo de avaliar as suas respostas em detrimento ao algoritmo empregado na metodologia proposta nesta tese, o EDD. Os algoritmos de otimização PS, SA and AG estão disponíveis no *toolbox* de otimização do MATLAB®.

Os algoritmos de otimização foram configurados da seguinte forma:

- EDD:
 - Tamanho da população: 50;
 - Número máximo de gerações: 800;
 - Critérios de parada: número de gerações e tolerância mínima da função de 10^{-6} ;
 - Probabilidade de cruzamento: 0,8;
 - Coeficiente de combinação: 0,8.
- PS:
 - Método de busca: *MADS Positive Basis 2N*;
 - Busca completa: sim;
 - Ordem da busca: consecutiva;
 - Critério de parada: tolerância da malha de 2^{-11} e tolerância mínima da função de 10^{-6} .
- SA:
 - Função de recozimento: recozimento rápido;
 - Intervalo de re-recozimento: 100;
 - Função de atualização da temperatura: Exponencial;
 - Função de probabilidade de aceitação: *Simulated annealing acceptance*;
 - critérios de parada: número máximo de avaliação da função objetivo de 3000 e tolerância mínima da função de 10^{-6} .
- AG:
 - Tamanho da população: 50;
 - Número máximo de gerações: 800;
 - Critérios de parada: número de gerações e tolerância mínima da função de 10^{-6} ;
 - Função de seleção: Uniforme estocástica;

- Função de mutação: Dependente da restrição;
- Função de cruzamento: Dependente da restrição;
- Reprodução: elite 5% da população e fração de cruzamento de 80% .

Desta forma, a Tabela 10 mostra os resultados de localização da falta para cada algoritmo, indicando os erros médios, os erros absolutos máximos e o desvio padrão dos erros para cada tipo de falta. As faltas aplicadas foram as mesmas empregadas na análise de sensibilidade do método, ou seja, posicionadas à 50% do terminal local da linha, com resistências na combinação 5 (5;50), porém com os fasores extraídos no período transitório (incidência da falta no instante 0,2791 [s]).

Tabela 10 – Erros na distância da falta em (%) considerando diferentes algoritmos de otimização. Falta aplicadas no instante 0,2791 [s], à 50% (128 [km]) do terminal L, resistência na combinação 5 (5;50) e fasores extraídos no período transitório pós-falta.

Tipo de falta	Métrica de erro	Evolução Diferencial Dinâmica	<i>Pattern Search</i>	<i>Simulated Annealing</i>	Algoritmo Genético
AT	Médio	-0,393	-9,947	-6,962	-14,855
	Desvio padrão	0,034	14,61	14,65	17,880
	Máximo	0,440	38,59	31,90	45,273
BCT	Médio	0,007	0,087	-2,938	-1,354
	Desvio padrão	0,004	1,706	9,242	2,811
	Máximo	0,015	3,302	15,88	7,973
BC	Médio	0,009	0,935	0,110	-2,792
	Desvio padrão	0,004	1,889	8,782	2,286
	Máximo	0,020	3,414	17,30	5,368
ABCT	Médio	-0,527	0,654	-3,164	3,361
	Desvio padrão	0,279	14,02	6,776	11,689
	Máximo	0,836	40,38	17,36	26,773

Observa-se na Tabela 10, que os erros de localização da falta utilizando o algoritmo EDD foram consideravelmente menores do que os erros ocorridos com o emprego dos demais algoritmos, corroborando a pesquisa da literatura sobre os otimizadores conduzida no Capítulo 5, o que levou à escolha do EDD como ferramenta de otimização para o método de localização de faltas proposto.

Conclusões e trabalhos futuros



No contexto de transmissão de energia elétrica a longas distâncias, a utilização de compensação série nas linhas de transmissão é benéfica, uma vez que aumenta a capacidade do fluxo de energia e aprimora a estabilidade do sistema elétrico. No entanto, o comportamento não linear dos compensadores série afeta negativamente os algoritmos de localização de faltas em linhas de transmissão compensadas.

O estado da arte sobre localização de faltas em linhas de transmissão com compensação série aponta uma série de deficiências nas soluções existentes: a necessidade de medições obtidas após a retirada da compensação, o conhecimento sobre o ponto de operação do MOV e da impedância da compensação, a inaplicabilidade para qualquer tipo de falta e demais limitações dependendo da posição do compensador.

Desta forma, o presente trabalho apresenta um algoritmo de localização de faltas em linhas de transmissão com compensação série capaz de sanar essas deficiências apresentadas na literatura. A partir da resolução de um problema de minimização, que considera os fasores de tensão e corrente pós-falta medidos e calculados, o método proposto consegue localizar faltas com precisão e robustez, mesmo em casos críticos com erros nos parâmetros da linha e na extração dos fasores. É essencial ressaltar que o projeto e a localização dos compensadores série não afetam o algoritmo apresentado. Além disso, o método pode localizar satisfatoriamente qualquer tipo de falta, independentemente da distância e resistência da falta.

Os resultados de avaliação do método proposto corroboram a sua eficiência e robustez em determinar o ponto de ocorrência da falta. Ressalta-se que na análise de precisão, o método apresenta erros máximos de 1,019%, mesmo considerando os fasores extraídos no período transitório dos sinais. Na análise de sensibilidade para desvios nos fasores, o método apresentou erros nos percentis 25 e 75 na faixa entre -0,7438% a 0,3885%; para desvios nos parâmetros da linha, na faixa entre -2,6003% a 2,4866%; e para desvios

nos equivalentes, na faixa entre $-0,6581\%$ a $0,0818\%$.

Apesar do método se apresentar robusto aos desvios nos fasores, parâmetros e equivalentes, os erros, também, evidenciam que a qualidade dos dados fornecidos ao método de otimização são importantes para a aumentar sua precisão. Fica evidente, também, que o filtro de Prony, utilizado para remover as componentes aperiódicas e de baixa frequência (conhecidas também como subsíncronas), desempenhou um papel fundamental no processo de extração de fasores, principalmente quando utilizados dados dos períodos transitórios dos sinais de tensão e corrente.

Outro fator importante no sucesso do método em localizar o ponto de ocorrência da falta com precisão, foi a utilização do algoritmo de otimização Evolução Diferencial Dinâmica. Os resultados apresentados na Tabela 10 mostram a sua superioridade em relação aos algoritmos de otimização PS, SA and AG para tratar os problemas de localização de faltas, conforme metodologia proposta nesta tese.

Por fim, como trabalhos futuros, ainda pode ser explorada a utilização de inteligência artificial no problema de localização de faltas tratado nesta tese. A inteligência artificial pode ser empregada em partes do processo de localização da falta ou no todo, como na estimativa das impedâncias das CSs, do tipo de falta ocorrido, dos fasores e, até mesmo, da distância de ocorrência da falta.

Referências

ABDULAL, W. *et al.* Mutation based simulated annealing algorithm for minimizing makespan in grid computing systems. *In: IEEE. 2011 3rd international conference on electronics computer technology.* [*S.l.: s.n.*], 2011. v. 6, p. 90–94.

ABEDINI, M. *et al.* A new traveling wave fault location algorithm in series compensated transmission line. *In: IEEE. 2013 21st Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE).* [*S.l.: s.n.*], 2013. p. 1–6.

BAINS, T. P. S. *et al.* Impedance-Based Fault Location Algorithm for Ground Faults in Series-Capacitor-Compensated Transmission Lines. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 33, n. 1, p. 189–199, 2018.

BAINS, T. P. S.; ZADEH, M. R. D. Enhanced phasor estimation technique for fault location in series-compensated lines. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 30, n. 4, p. 2058–2060, 2015.

BAINS, T. P. S.; ZADEH, M. R. D. Supplementary impedance-based fault-location algorithm for series-compensated lines. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 31, n. 1, p. 334–342, 2016.

BOWMAN, W.; MCNAMEE, J. M. Development of equivalent pi and t matrix circuits for long untransposed transmission lines. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v. 83, n. 6, p. 625–632, 1964.

CAI, D.; ZHANG, J. New Fault-Location Algorithm for Series-Compensated Double-Circuit Transmission Line. **IEEE Access**, v. 8, p. 210685–210694, 2020.

DE AGUIAR, A. M. *et al.* Localização de faltas em alimentadores de distribuição utilizando computação distribuída e algoritmo heurístico. *In: XXII Congresso Brasileiro de Automática - CBA2018.* [*S.l.: s.n.*], 2018.

DENG, Y. *et al.* Fault location estimator for series compensated transmission line under power oscillation conditions. **IET Generation, Transmission & Distribution**, IET, v. 10, n. 13, p. 3135–3141, 2016.

DI SANTO, S. G. **Localização de Faltas em Linhas de Transmissão com Múltiplas Derivações Utilizando Dados de Somente Dois Terminais.** jan 2010.

Dissertação (Mestrado) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, jan 2010.

DI SANTO, S. G. **Localização de Falhas em Linhas de Transmissão com Derivações, Constituídas por Circuito Duplo e Trechos Não Transpostos**. dez 2012. Tese (Doutorado) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, dez 2012.

DI SANTO, S. G.; ALBERTINI, A. D. R.; TIFERES, R. R. Optimization-based fault location algorithm for series-compensated power transmission lines. **IEEE Access**, v. 10, p. 46864–46877, 2022.

DI SANTO, S. G.; PEREIRA, C. E. d. M. Fault location method applied to transmission lines of general configuration. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 69, p. 287–294, 2015.

DI SANTO, S. G.; PEREIRA, C. E. d. M.; ZANETTA JR, L. C. Localização de falhas em linhas de transmissão com múltiplas derivações utilizando dados de somente dois terminais. **Controle & Automação**, v. 22, p. 144–156, 2011.

DI SANTO, S. G.; PEREIRA, C. E. de M. Fault location method applied to transmission lines of general configuration. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 69, p. 287–294, 2015. ISSN 0142-0615. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061515000332>.

DI SANTO, S. G.; PEREIRA, C. E. M. Fault location method for untransposed transmission lines with derivations. *In: PES T D 2012*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 1–8.

FUENTES, R. A. P.; MANASSERO JR, G.; DI SANTO, S. G. Localização de falhas em linhas de transmissão baseada em métodos heurísticos utilizando dados de um terminal. *In: XI Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission - CLAGTEE 2015*. [S.l.: s.n.], 2015.

GAJARE, S.; PRADHAN, A. K. An accurate fault location method for multi-circuit series compensated transmission lines. **IEEE Transactions on Power Systems**, IEEE, v. 32, n. 1, p. 572–580, 2016.

GHAZIZADEH-AHSAEE, M. Time-domain based fault location for series compensated transmission lines without requiring fault type. **Electric Power Systems Research**, v. 181, p. 106171, 2020. ISSN 0378-7796. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779619304900>.

GOLDSWORTHY, D. L. A linearized model for mov-protected series capacitors. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 2, n. 4, p. 953–957, 1987.

GRAINGER, J.; STEVENSON, W. **Power System Analysis**. [S.l.: s.n.]: McGraw-Hill, 1994. ISBN 0-07-113338-0.

HAUER, J.; DEMEURE, C.; SCHARF, L. Initial results in prony analysis of power system response signals. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 5, n. 1, p. 80–89, 1990.

- HOOKE, R.; JEEVES, T. A. “direct search” solution of numerical and statistical problems. **Journal of the ACM (JACM)**, ACM New York, NY, USA, v. 8, n. 2, p. 212–229, 1961.
- HUANG, Z.; CHEN, Y.; GONG, Q. A protection and fault location scheme for EHV line with series capacitor based on travelling waves and wavelet analysis. *In: IEEE. Proceedings. International Conference on Power System Technology.* [S.l.: s.n.], 2002. v. 1, p. 290–294.
- HUSSAIN, S.; OSMAN, A. Fault location on series-compensated lines using unsynchronized measurements. *In: 2013 IEEE Power Energy Society General Meeting.* [S.l.: s.n.], 2013.
- IEEE. Ieee standard for synchrophasor measurements for power systems. **IEEE Std C37.118.1-2011 (Revision of IEEE Std C37.118-2005)**, p. 1–61, 2011.
- INGBER, L.; ROSEN, B. Genetic algorithms and very fast simulated reannealing: A comparison. **Mathematical and computer modelling**, Elsevier, v. 16, n. 11, p. 87–100, 1992.
- IZYKOWSKI, J. *et al.* Fault location on double-circuit series-compensated lines using two-end unsynchronized measurements. **IEEE transactions on power delivery**, IEEE, v. 26, n. 4, p. 2072–2080, 2011.
- KANG, N.; CHEN, J.; LIAO, Y. A fault-location algorithm for series-compensated double-circuit transmission lines using the distributed parameter line model. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 30, n. 1, p. 360–367, 2015.
- KILGORE, L.; ELLIOTT, L.; TAYLOR, E. The prediction and control of self-excited oscillations due to series capacitors in power systems. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, IEEE, n. 3, p. 1305–1311, 1971.
- KOROT, D.; MARKEN, P.; BOCK, L. The next fifty years of series capacitors—and the last eighty-six. *In: IEEE. 2014 IEEE PES T&D Conference and Exposition.* [S.l.: s.n.], 2014. p. 1–5.
- KUNDUR, P. **Power system stability and control**. New York: McGraw-Hill, Inc., 1994.
- LAKKIREDDY, J. *et al.* Steady state voltage stability enhancement using shunt and series facts devices. *In: IEEE. 2015 Clemson University Power Systems Conference (PSC).* [S.l.: s.n.], 2015. p. 1–5.
- MANASSERO JR, G.; DI SANTO, S. G.; ROJAS, D. G. Fault location in series-compensated transmission lines based on heuristic method. **Electric Power Systems Research**, v. 140, p. 950–957, 2016. ISSN 0378-7796.
- MANASSERO JR, G.; DI SANTO, S. G.; SOUTO, L. Heuristic method for fault location in distribution feeders with the presence of distributed generation. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 8, n. 6, p. 2849–2858, 2017.

- MENG, Q. *et al.* Genetic algorithms encoding study and a sufficient convergence condition of gas. *In: IEEE. IEEE SMC'99 Conference Proceedings. 1999 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (Cat. No. 99CH37028)*. [S.l.: s.n.], 1999. v. 1, p. 649–652.
- MILLER, J.; BRUNET-WATSON, M.; LEIGHFIELD, J. **Review of Series Compensation for Transmission Lines**. [S.l.], 2014.
- Ministério de Minas e Energia; Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Nacional de Energia 2050**. [S.l.], 2020.
- Ministério de Minas e Energia; Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2030**. [S.l.], 2021.
- NAIDU, O. D.; PRADHAN, A. K. Model Free Traveling Wave Based Fault Location Method for Series Compensated Transmission Line. *IEEE Access*, v. 8, p. 193128–193137, 2020.
- NEMATI, M. *et al.* Accurate fault location element for series compensated double-circuit transmission lines utilizing negative-sequence phasors. **Electric Power Systems Research**, v. 194, p. 107064, 2021. ISSN 0378-7796. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779621000456>.
- Operador Nacional do Sistema Elétrico. **Sumário do Programa Mensal de Operação**. Brasil, 2022.
- ORDÓÑEZ, C. A.; GÓMEZ-EXPÓSITO, A.; MAZA-ORTEGA, J. M. Series Compensation of Transmission Systems: A Literature Survey. **Energies**, v. 14, n. 6, 2021. ISSN 1996-1073. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/6/1717>.
- PEIXOTO, L. d. B. *et al.* Aplicação do método de simples reatância e takagi na localização de falta em uma rede de média tensão de um parque eólico. *In: VIII Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos - SBSE2020*. [S.l.: s.n.], 2020.
- QING, A. Dynamic differential evolution strategy and applications in electromagnetic inverse scattering problems. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 44, n. 1, p. 116–125, 2006.
- RAJARMAN, R. *et al.* Determination of location and amount of series compensation to increase power transfer capability. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 13, n. 2, p. 294–300, 1998.
- SADEH, J.; ADINEHZADEH, A. Accurate fault location algorithm for transmission line in the presence of series connected facts devices. **International journal of electrical power & energy systems**, Elsevier, v. 32, n. 4, p. 323–328, 2010.
- SADEH, J. *et al.* Accurate fault location algorithm for series compensated transmission lines. **IEEE transactions on power delivery**, IEEE, v. 15, n. 3, p. 1027–1033, 2000.
- SAFFARIAN, A.; ABASI, M. Fault location in series capacitor compensated three-terminal transmission lines based on the analysis of voltage and current phasor equations and asynchronous data transfer. **Electric Power Systems Research**, v. 187, p. 106457, 2020. ISSN 0378-7796. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779620302613>.

- SAHA, M. *et al.* A new accurate fault locating algorithm for series compensated lines. **IEEE transactions on power delivery**, IEEE, v. 14, n. 3, p. 789–797, 1999.
- SAHA, M. *et al.* Fault location in uncompensated and series-compensated parallel lines. *In: IEEE. 2000 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No. 00CH37077)*. [S.l.: s.n.], 2000. v. 4, p. 2431–2436.
- SAHOO, B.; SAMANTARAY, S. R. An enhanced fault detection and location estimation method for TCSC compensated line connecting wind farm. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, Elsevier, v. 96, p. 432–441, 2018.
- STORN, R.; PRICE, K. Differential evolution—a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces. **J. Global Optimization**, Springer, v. 11, n. 4, p. 341–359, 1997.
- TAHERI, R.; ESLAMI, M.; DAMCHI, Y. Single-end current-based algorithm for fault location in series capacitor compensated transmission lines. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 123, p. 106254, 2020. ISSN 0142-0615. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061520307948>.
- YU, C.-S. *et al.* A new PMU-based fault location algorithm for series compensated lines. **IEEE transactions on power delivery**, IEEE, v. 17, n. 1, p. 33–46, 2002.
- ZHANG, Y. *et al.* A New Fault-Location Algorithm for Series-Compensated Double-Circuit Transmission Lines Based on the Distributed Parameter Model. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 32, n. 6, p. 2398–2407, 2017.
- ZHANG, Y. *et al.* A new fault-location algorithm for series-compensated double-circuit transmission lines based on the distributed parameter model. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 32, n. 6, p. 2398–2407, 2017.

APÊNDICES

Método de Prony



O método de Prony é uma extensão da série de Fourier, onde ao invés de conter somente um somatório de senos e cossenos multiplicados por constantes, ele também apresenta um somatório de senos e cossenos, porém multiplicados por funções exponenciais (HAUER; DEMEURE; SCHARF, 1990).

Para melhor entendimento do método, considere que um sinal $v(t)$ possa ser aproximado pela função descrita por (A.1).

$$\hat{v}(t) = \sum_{k=1}^p b_k e^{\sigma_k t} \cos(\omega_k t + \theta_k) \quad (\text{A.1})$$

Considere, ainda, que o sinal $v(t)$ é amostrado por um período de observação, resultando em N amostras igualmente espaçadas em intervalos Δt . Assim, $v(n\Delta t) = v(n)$, $n = 0, 1, \dots, N - 1$.

Reescrevendo (A.1) em termos de funções exponenciais e na forma discreta, tem-se:

$$\hat{v}(n) = \sum_{k=1}^q B_k e^{\lambda_k n \Delta t} \quad (\text{A.2})$$

Onde $B_k = \frac{b_k}{2}$, $\lambda_k = \sigma_k \pm j\omega_k$ e $q = 2p$.

Ainda, fazendo $e^{\lambda_k n \Delta t} = z_k^n$, (A.2) pode ser escrita em termos dessa variável, como:

$$\hat{v}(n) = \sum_{k=1}^q B_k z_k^n \quad (\text{A.3})$$

Dessa forma, pretende-se determinar os valores de B_k e z_k . Para atingir esse objetivo, considere a expansão de (A.3) aplicada a cada amostra do sinal e escrita na forma de um

sistema matricial. Além disso, almeja-se que $\hat{v}(n) = v(n)$, assim:

$$\begin{bmatrix} v(0) \\ v(1) \\ \vdots \\ v(N-1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_1^0 & z_2^0 & \cdots & z_q^0 \\ z_1^1 & z_2^1 & \cdots & z_q^1 \\ z_1^2 & z_2^2 & \cdots & z_q^2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_1^{N-1} & z_2^{N-1} & \cdots & z_q^{N-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \vdots \\ B_q \end{bmatrix} \quad (\text{A.4})$$

Para resolver o sistema (A.4), de modo a obter os valores das amplitudes B_k , devem-se, primeiramente, determinar os valores de z_k .

Pode-se escrever (A.4) na forma compacta:

$$\mathbf{ZB} = \mathbf{V} \quad (\text{A.5})$$

Para determinar os valores de z_k , considere a seguinte equação de diferenças:

$$u_k - a_1 u_{k-1} - a_2 u_{k-2} - \cdots - a_p u_{k-p} = 0 \quad (\text{A.6})$$

Uma possível solução de (A.6) tem a forma:

$$u_k = cz^k \quad (\text{A.7})$$

Assim, substituindo (A.7) em (A.6), tem-se:

$$cz^{k-q} (z^q - a_1 z^{q-1} - a_2 z^{q-2} - \cdots - a_q) = 0 \quad (\text{A.8})$$

Para não obter a solução trivial:

$$z^q - a_1 z^{q-1} - a_2 z^{q-2} - \cdots - a_q = 0 \quad (\text{A.9})$$

Desta forma, desejam-se que as raízes do polinômio (A.9) sejam iguais aos valores de z_k contidos em (A.4).

Assim, dispondo os coeficientes de (A.9) em um vetor de dimensão $1 \times N$, tem-se:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -a_q & -a_{q-1} & \cdots & -a_1 & 1 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}_{1 \times N} \quad (\text{A.10})$$

Multiplicando ambos os lados de (A.5) por \mathbf{A} :

$$\mathbf{AZB} = \mathbf{AV} \quad (\text{A.11})$$

Assim, para que a condição de igualdade entre as raízes, descrita anteriormente, seja obtida, o produto \mathbf{AZ} deve ser nulo e, portanto, \mathbf{AV} também deverá ser. Desta forma,

tomando um instante de tempo arbitrário e considerando $N = 2q$ podem-se determinar os valores dos coeficientes $a_1 \cdots a_q$, como:

$$\begin{bmatrix} v(q-1) & v(q-2) & \cdots & v(0) \\ v(q-0) & v(q-1) & \cdots & v(1) \\ v(q+1) & v(q-0) & \cdots & v(2) \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ v(N-2) & v(N-3) & \cdots & v(N-q-1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ \vdots \\ a_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v(q+0) \\ v(q+1) \\ v(q+2) \\ \vdots \\ v(N-1) \end{bmatrix} \quad (\text{A.12})$$

Uma vez determinados os valores dos coeficientes, os valores de z_k podem ser calculados encontrando-se as raízes de (A.9) e, por meio de (A.4) determinam-se os valores de B_k .

Ainda, uma vez que $z_k = e^{\lambda_k \Delta t}$, calculam-se os valores de σ_k e ω_k , uma vez que esses valores são, respectivamente, as partes real e imaginária de λ_k .