

SILVIO GIUSEPPE DI SANTO

LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO COM
MÚLTIPLAS DERIVAÇÕES UTILIZANDO DADOS DE SOMENTE DOIS
TERMINAIS

Dissertação apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para obtenção
do título de Mestre em Engenharia Elétrica

São Paulo
2009

SILVIO GIUSEPPE DI SANTO

LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO COM
MÚLTIPLAS DERIVAÇÕES UTILIZANDO DADOS DE SOMENTE DOIS
TERMINAIS

Dissertação apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para obtenção
do título de Mestre em Engenharia Elétrica

Área de concentração:
Sistemas de Potência

Orientador:
Prof. Dr. Carlos Eduardo de Morais Pereira

São Paulo
2009

FICHA CATALOGRÁFICA

Di Santo, Silvio Giuseppe

Localização de faltas em linhas de transmissão com múltiplas derivações utilizando dados de somente dois terminais / S.G. Di Santo. -- São Paulo, 2009.

117 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas.

1. Linhas de transmissão de energia elétrica 2. Sistemas elétricos de potência 3. Proteção de sistemas elétricos I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas II. t.

Dedico este trabalho à minha esposa
Katia e aos meus pais.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Prof. Dr. Carlos Eduardo de Moraes Pereira, pela orientação e pelo conhecimento transmitido.

Aos Profs. Drs. Luiz Cera Zanetta Jr. e Giovanni Manassero Jr. pelas sugestões e comentários apresentados no exame de qualificação.

Ao CNPQ pela bolsa de estudo.

Às demais pessoas que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização deste trabalho.

RESUMO

Neste trabalho foi desenvolvido um método de localização de faltas em linhas de transmissão constituídas de circuito simples e continuamente transpostas com derivações. Este método utiliza fasores de tensão e corrente pré-falta e pós-falta medidos apenas nos terminais local e remoto, para determinar as informações da falta, as quais são: local, distância, resistência e tipo.

O método de localização de faltas proposto neste trabalho é composto pelo processo de obtenção dos fasores, pelo algoritmo de determinação do tipo de falta, pelos algoritmos de estimativa de cargas e de localização de faltas, onde o algoritmo de localização de faltas foi proposto neste trabalho.

A principal característica deste novo método é a de não haver necessidade de reduzir a linha para uma linha equivalente de dois terminais para aplicação do método de localização de faltas usando dados de um ou dois terminais para determinar o possível ou os possíveis locais de ocorrência da falta, uma vez que o algoritmo de localização de faltas proposto neste trabalho possui uma função objetivo que determina de forma direta o trecho de ocorrência da falta.

Com o objetivo de avaliar a eficiência do método de localização de faltas proposto, este foi submetido a simulações de variação de distância de falta, de resistência de falta, de tipo de falta e simulações de erros nos fasores e nos parâmetros da linha de transmissão.

Palavras-chave: Linhas de transmissão. Localização de faltas. Otimização.

ABSTRACT

In this work was developed a fault location method on single circuit continuously transposed transmission lines with derivations. This method uses pre-fault and post-fault voltage and current phasors, measured at local and remote terminals only, to determine the information about the fault, which are: location, distance, resistance and type.

The fault location method proposed in this work is composed by the phasor obtaining process, the fault type determination algorithm, the load estimation algorithm and the fault location algorithm, where the fault location algorithm has been proposed in this work.

The main characteristic of this new method is no need to reduce the line to two terminals equivalent line to application of the one or two terminal fault location method which determine the possible fault location occurrence, since the fault location algorithm proposed in this work has an objective function that determines by direct way the exact path of fault occurrence.

In order to evaluate the efficiency of the proposed fault location method, it was subjected to fault distance, fault resistance and fault type variation simulations and phasors and transmission lines parameters errors simulations.

Keywords: Transmission lines. Fault location. Optimization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Linha de transmissão de circuito simples com falta no ponto F . (LIU et al., 2008)	24
Figura 1.2 – Linha com várias derivações. (LIU et al., 2008)	25
Figura 1.3 – Procedimento para determinação do local e da distância de falta. (LIU et al., 2008)	26
Figura 1.4 – Análise dos índices D obtidos para os N terminais. (LIU et al., 2008)...	27
Figura 1.5 – Rede utilizada para teste da metodologia proposta. (LIAO, 2008)	30
Figura 2.1 – Estágios para obtenção dos fasores de tensão e corrente	32
Figura 2.2 – Amostragem de um sinal com componentes de 60 Hz e 180 Hz	34
Figura 2.3 – Parâmetros de especificação de um filtro passa-baixas.	36
Figura 2.4 – Resposta em frequência do módulo da função de transferência. (SEDRA e SMITH, 2000).	37
Figura 2.5 – Gráfico para determinação dos pólos do filtro de Butterworth. (SEDRA e SMITH, 2000).....	38
Figura 2.6 – Pólos do filtro de Butterworth	41
Figura 2.7 – Circuito de um filtro de 1ª ordem	42
Figura 2.8 – Circuito de um filtro de 2ª ordem	43
Figura 2.9 – Circuito de um filtro de 3ª ordem obtido a partir do cascadeamento dos circuitos das figuras 2.7 e 2.8.....	43
Figura 2.10 – Sinal de entrada com fundamental de 60 Hz e harmônica de 900 Hz, saída do filtro de Butterworth e saída do circuito	45
Figura 2.11 – Resposta em frequência do filtro MMQ para $N = 8$	54
Figura 2.12 – Resposta em frequência do filtro MMQ para $N = 16$	54
Figura 2.13 – Resposta em frequência da associação em série do filtro de Butterworth com o filtro MMQ.....	55
Figura 2.14 – Forma de onda da tensão e módulo calculado pelo filtro MMQ	56
Figura 2.15 – Fase da tensão da figura 2.14 calculada pelo filtro MMQ	57
Figura 2.16 – Fase do sinal de tensão e do sinal de referência	57
Figura 2.17 – Fase do sinal de tensão da figura 2.14	58

Figura 3.1 – Linha de transmissão com derivações, onde L representa o terminal L , R representa o terminal R e F representa as faltas.....	59
Figura 3.2 – Passos do método de localização de faltas	60
Figura 3.3 – Fluxograma da estimativa inicial da impedância das cargas.....	64
Figura 3.4 – Fluxograma da função objetivo de estimativa da impedância das cargas	67
Figura 3.5 – Fluxograma do método de determinação do tipo de falta	71
Figura 3.6 – Rede de exemplo, com n trechos, para explicação do algoritmo.....	73
Figura 3.7 – Fluxograma do processo de varredura da rede	75
Figura 3.8 – Detalhes do trecho 1 da rede da figura 3.6	78
Figura 3.9 – Diagramas de sequência zero, positiva e negativa para a ligação estrela aterrada/estrela aterrada.....	81
Figura 3.10 – Diagramas de sequência zero, positiva e negativa para a ligação delta/estrela aterrada	81
Figura 3.11 – Diagramas de sequência zero, positiva e negativa para a ligação delta/estrela aterrada	82
Figura 3.12 – Fluxograma dos passos da função objetivo	90
Figura 4.1 – Rede utilizada para teste do método de localização de faltas proposto	93
Figura 4.2 – Geometria da torre utilizada na rede de transmissão simulada	94
Figura 4.3 – Tensões no terminal local para falta fase A-terra.....	100
Figura 4.4 – Correntes no terminal local para falta fase A-terra.....	101
Figura 4.5 – Tensões no terminal remoto para falta fase A-terra	101
Figura 4.6 – Correntes no terminal remoto para falta fase A-terra	102
Figura 4.7 – Tensões no terminal local para falta trifásica	102
Figura 4.8 – Correntes no terminal local para falta trifásica	103
Figura 4.9 – Tensões no terminal remoto para falta trifásica	103
Figura 4.10 – Correntes no terminal remoto para falta trifásica.....	104
Figura 4.11 – Curva de densidade de probabilidades de erro.....	121
Figura 4.12 – Histograma dos erros absolutos das distâncias de falta para faltas no trecho 2, considerando erros nos fasores	123
Figura 4.13 – Histograma dos erros absolutos das distâncias de falta para faltas no trecho 4, considerando erros nos fasores	124

Figura 4.14 – Histograma dos erros absolutos das distâncias de falta para faltas no trecho 6, considerando erros nos fasores	125
Figura 4.15 – Histograma dos erros absolutos das distâncias de falta para faltas no trecho 2, considerando erros nos parâmetros da linha	127
Figura 4.16 – Histograma dos erros absolutos das distâncias de falta para faltas no trecho 4, considerando erros nos parâmetros da linha	128
Figura 4.17 – Histograma dos erros absolutos das distâncias de falta para faltas no trecho 6, considerando erros nos parâmetros da linha	129

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Características dos cabos condutores e do cabo-guarda.....	94
Tabela 4.2 – Características dos transformadores.....	95
Tabela 4.3 – Cargas conectadas à rede	96
Tabela 4.4 – Parâmetros de sequência positiva dos geradores equivalentes.....	96
Tabela 4.5 – Parâmetros de sequência zero dos geradores equivalentes.....	96
Tabela 4.6 – Fasores de tensão e corrente, pré-falta e pós-falta, nos terminais local e remoto para faltas fase-terra e trifásica	99
Tabela 4.7 – Cargas estimadas para faltas fase-terra (AN) e trifásica a 50 km do terminal local, no trecho 2.....	104
Tabela 4.8 – Cargas estimadas para faltas fase-terra (AN) e trifásica a 35 km do início da derivação 2, no trecho 4	105
Tabela 4.9 – Cargas estimadas para faltas fase-terra (AN) e trifásica a 50 km do início da derivação 1, no trecho 6	106
Tabela 4.10 – Resultados para a variação da distância de falta para faltas fase A-terra	107
Tabela 4.11 – Resultados para falta fase A – terra nos pontos de derivação d_1 e d_2	109
Tabela 4.12 – Resultados para a variação da distância de falta para faltas fases BC-terra	109
Tabela 4.13 – Resultados para falta fases BC – terra nos pontos de derivação d_1 e d_2	110
Tabela 4.14 – Resultados para a variação da distância de falta para faltas fases BC	111
Tabela 4.15 – Resultados para falta fases BC nos pontos de derivação d_1 e d_2	112
Tabela 4.16 – Resultados para a variação da distância de falta para faltas fases ABC	113
Tabela 4.17 – Resultados para falta fases ABC nos pontos de derivação d_1 e d_2 ..	114
Tabela 4.18 – Resultados para a variação do tipo de falta para falta no trecho 2 a 50 km do terminal local.....	115
Tabela 4.19 – Resultados para a variação do tipo de falta para falta no trecho 4 a 35 km do início da derivação 2 (d_2)	116

Tabela 4.20 – Resultados para a variação do tipo de falta para falta no trecho 6 a 50 km do início da derivação 1 (d_1)	116
Tabela 4.21 – Resultados para a variação da resistência de falta para falta no trecho 2 a 50 km do terminal local.....	118
Tabela 4.22 – Resultados para a variação da resistência de falta para falta no trecho 4 a 35 km do início da derivação 1 (d_1)	119
Tabela 4.23 – Resultados para a variação da resistência de falta para falta no trecho 6 a 50 km do início da derivação 2 (d_2)	120
Tabela 4.24 – Resultados para erros nos fasores de tensão e corrente, pré-falta e pós-falta, para falta no trecho 2 a 50 km do terminal local	123
Tabela 4.25 – Resultados para erros nos fasores de tensão e corrente, pré-falta e pós-falta, para falta no trecho 4 a 35 km do início da derivação 2 (d_2).....	124
Tabela 4.26 – Resultados para erros nos fasores de tensão e corrente, pré-falta e pós-falta, para falta no trecho 6 a 50 km do início da derivação 1 (d_1).....	125
Tabela 4.27 – Resultados para erros nos parâmetros da linha, para falta no trecho 2 a 50 km do terminal local.....	126
Tabela 4.28 – Resultados para erros nos parâmetros da linha, para falta no trecho 4 a 35 km do início da derivação 2 (d_2)	127
Tabela 4.29 – Resultados para erros nos parâmetros da linha, para falta no trecho 6 a 50 km do início da derivação 1 (d_1)	128

LISTA DE SÍMBOLOS

L	Terminal local
R	Terminal remoto
x	Distância a partir do terminal remoto
V_x	Tensão no ponto x
I_x	Corrente no ponto x
A, B, C, D	Parâmetros do quadripólo que representa a linha
γ	Constante de propagação da linha
z	Impedância série da linha por unidade de comprimento
y	Admitância shunt da linha por unidade de comprimento
Z_c	Impedância característica da linha
V_L	Tensão no terminal local
I_L	Corrente no terminal local
V_R	Tensão no terminal remoto
I_R	Corrente no terminal remoto
$V_{x,L}$	Tensão no ponto x calculado com os dados do terminal local
$V_{x,R}$	Tensão no ponto x calculado com os dados do terminal remoto
D	Índice de localização da falta por unidade de comprimento
l	Comprimento total entre o terminal local e o terminal remoto
m	Distância de falta em pu
d_{KL}	Relação entre as diferenças de tensão pré-falta e pós-falta dos terminais K e L
$E_K^{(i)}$	Tensões sequenciais no terminal K durante a falta
$E_K^{(1)0}$	Tensão de sequência positiva pré-falta no terminal K
g	Relação entre as tensões de sequência negativa e zero no terminal K
R_f	Resistência de falta
$E_f^{(1)0}$	Tensão de sequência positiva pré-falta no ponto da falta
N	Número de amostras em uma janela de dados

ω_p	Frequência angular da borda de passagem
ω_s	Frequência angular da borda da faixa de bloqueio
$A_{m\acute{a}x}$	Atenuação máxima na faixa de transmissão de um filtro passa-baixas
$A_{m\acute{i}n}$	Atenuação mínima na faixa de bloqueio de um filtro de passa-baixas
*	Representa complexo conjugado
α	Constante de decaimento da componente exponencial
t	Tempo
M_k	Módulo da componente fundamental de um sinal no instante de amostragem k
Φ_k	Fase da componente fundamental de um sinal no instante de amostragem k
$[V_{abc}]_{pr\acute{e}}^L$	Tensões de fase pré-falta no terminal local
$[V_{abc}]_{pr\acute{e}}^R$	Tensões de fase pré-falta no terminal remoto
$[V_{012}]_{pr\acute{e}}^L$	Tensões sequenciais pré-falta no terminal local
$[V_{012}]_{pr\acute{e}}^R$	Tensões sequenciais pré-falta no terminal remoto
$[I_{abc}]_{pr\acute{e}}^L$	Correntes de fase pré-falta no terminal local
$[I_{abc}]_{pr\acute{e}}^R$	Correntes de fase pré-falta no terminal remoto
$[I_{012}]_{pr\acute{e}}^L$	Correntes sequenciais pré-falta no terminal local
$[I_{012}]_{pr\acute{e}}^R$	Correntes sequenciais pré-falta no terminal remoto
$[V_{abc}]_{p\acute{o}s}^L$	Tensões de fase pós-falta no terminal local
$[V_{abc}]_{p\acute{o}s}^R$	Tensões de fase pós-falta no terminal remoto
$[V_{012}]_{p\acute{o}s}^L$	Tensões sequenciais pós-falta no terminal local
$[V_{012}]_{p\acute{o}s}^R$	Tensões sequenciais pós-falta no terminal remoto

$[I_{abc}]_{pós}^L$	Correntes de fase pós-falta no terminal local
$[I_{abc}]_{pós}^R$	Correntes de fase pós-falta no terminal remoto
$[I_{012}]_{pós}^L$	Correntes sequenciais pós-falta no terminal local
$[I_{012}]_{pós}^R$	Correntes sequenciais pós-falta no terminal remoto
T	Matriz de transformação
Z_{1eq}^L	Impedância de sequência positiva do gerador equivalente do terminal local
Z_{0eq}^L	Impedância de sequência zero do gerador equivalente do terminal local
E_1^L	Tensão interna de sequência positiva do gerador equivalente do terminal local
Z_{1eq}^R	Impedância de sequência positiva do gerador equivalente do terminal remoto
Z_{0eq}^R	Impedância de sequência zero do gerador equivalente do terminal remoto
E_1^R	Tensão interna de sequência positiva do gerador equivalente do terminal local
P_{tot}	Potência ativa total fornecida pelos geradores
Re	Parte real de um número complexo
S_r^j	Potência aparente de referência para a carga j
P_r^j	Potência ativa de referência para a carga j
S_{carga}^j	Potência aparente da carga j
Z_{carga}^j	Impedância da carga
P_{trecho}^u	Potência ativa dissipada no trecho u da linha
Z_{trecho}^u	Impedância série total do trecho u da linha
I_f^u	Corrente de fase do trecho u da linha

P_{trafo}^j	Potência ativa dissipada no transformador j
Z_{trafo}^j	Impedância de curto-circuito do transformador j
P_{perdas}	Potência ativa total dissipada na linha
$P_{totcargas}$	Potência ativa total das cargas
$[V_{barras}]$	Tensões nos nós da linha
I_1^L _{précalc}	Corrente de sequência positiva pré-falta no terminal local calculada pelo algoritmo
V_1^L _{précalc}	Tensão de sequência positiva pré-falta no terminal local calculada pelo algoritmo
I_1^R _{précalc}	Corrente de sequência positiva pré-falta no terminal remoto calculada pelo algoritmo
V_1^R _{précalc}	Tensão de sequência positiva pré-falta no terminal remoto calculada pelo algoritmo
$[Y_{1nós}]$	Matriz de admitâncias de sequência positiva
$[Y_{0nós}]$	Matriz de admitâncias de sequência zero
$[Z_{1nós}]$	Matriz de impedâncias de sequência positiva
$[Z_{0nós}]$	Matriz de impedâncias de sequência zero
$[V_{1nós}]$ _{précalc}	Tensões calculadas de sequência positiva pré-falta nos nós da linha
$[V_{0nós}]$ _{póscal}	Tensões calculadas de sequência zero pós-falta nos nós da linha
$[V_{1nós}]$ _{póscal}	Tensões calculadas de sequência positiva pós-falta nos nós da linha
$[V_{2nós}]$ _{póscal}	Tensões calculadas de sequência negativa pós-falta nos nós da linha
$[V_{abc}]$ _{póscal} ^L	Tensões de fase no terminal local calculadas
$[I_{abc}]$ _{póscal} ^L	Correntes de fase no terminal local calculadas
$[V_{abc}]$ _{póscal} ^R	Tensões de fase no terminal remoto calculadas

$[I_{abc}]_{p\acute{o}s\text{calc}}^R$	Correntes de fase no terminal remoto calculadas
Y_1^{0-p}	Admitância shunt de sequência positiva por unidade de comprimento entre o início do trecho e o ponto p
Y_1^{p-comp}	Admitância shunt de sequência positiva por unidade de comprimento entre o ponto p e o final do trecho
Y_0^{0-p}	Admitância shunt de sequência zero por unidade de comprimento entre o início do trecho e o ponto p
Y_0^{p-comp}	Admitância shunt de sequência zero por unidade de comprimento entre o ponto p e o final do trecho
Z_1^{0-p}	Impedância série de sequência positiva por unidade de comprimento entre o início do trecho e o ponto p
Z_1^{p-comp}	Impedância série de sequência positiva por unidade de comprimento entre o ponto p e o final do trecho
Z_0^{0-p}	Impedância série de sequência zero por unidade de comprimento entre o início do trecho e o ponto p
Z_0^{p-comp}	Impedância série de sequência zero por unidade de comprimento entre o ponto p e o final do trecho
$Y_0^{CT}, Y_1^{CT}, Y_2^{CT}$	Admitância de sequência zero, positiva e negativa do conjunto carga-transformador
Z_{PS}	Impedância de curto-circuito entre o primário e o secundário do transformador
Z_{ST}	Impedância de curto-circuito entre o secundário e o terciário do transformador
Z_{PT}	Impedância de curto-circuito entre o primário e o terciário do transformador
I_1^{NL}, I_1^{NR}	Corrente de sequência positiva de Norton no terminal local e remoto
$I_0^{falta}, I_1^{falta}, I_2^{falta}$	Componentes sequenciais da corrente de falta

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	19
1.1	OBJETIVO	19
1.2	MOTIVAÇÃO.....	19
1.3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
1.3.1	Método desenvolvido em (LIU et al., 2008).....	23
1.3.2	Método desenvolvido em (LIAO, 2008).....	27
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	31
2	Processamento dos sinais de tensão e corrente	32
2.1	FILTRAGEM ANALÓGICA DE SINAIS.....	33
2.1.1	Filtro analógico de Butterworth.....	36
2.1.2	Projeto de filtros passa-baixas analógicos passivos.....	39
2.2	FILTRAGEM DIGITAL DE SINAIS	45
2.2.1	Filtro baseado no método dos mínimos quadrados (MMQ).....	47
2.3	OBTENÇÃO DOS FASORES DE TENSÃO E CORRENTE	55
3	MÉTODO DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS PROPOSTO.....	59
3.1	ALGORITMO DE ESTIMATIVA DAS CARGAS E EQUIVALENTES.....	61
3.1.1	Procedimento para estimativa do equivalente e da tensão interna dos geradores	62
3.1.2	Procedimento para estimativa inicial das cargas	64
3.1.3	Função objetivo para estimativa das cargas	67
3.2	DETERMINAÇÃO DO TIPO DE FALTA.....	70
3.3	ALGORITMO DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS.....	73

3.3.1	Processo de varredura da rede e obtenção do local da falta	74
3.3.2	Obtenção do erro para o caso de a falta estar no trecho suposto, da distância e da resistência de falta.....	76
4	ANÁLISE DE DESEMPENHO DO MÉTODO DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS PROPOSTO	92
4.1	ESTRUTURA DA REDE SIMULADA.....	93
4.1.1	Configurações da linha de transmissão.....	93
4.1.2	Transformadores ligados às cargas	95
4.1.3	Cargas conectadas à rede	95
4.1.4	Parâmetros dos equivalentes	96
4.2	RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES.....	97
4.2.1	Avaliação do método de obtenção dos fasores.....	98
4.2.2	Avaliação do algoritmo de estimativa de cargas	104
4.2.3	Avaliação do algoritmo de localização de faltas.....	106
4.2.3.1	Resultados para variação da distância de falta.....	107
4.2.3.2	Resultados para variação do tipo de falta	114
4.2.3.3	Resultados para variação da resistência de falta.....	117
4.2.3.4	Resultados para variação nos fasores de tensão e corrente e variação dos parâmetros da linha	120
4.2.3.5	Comentários sobre os resultados	129
5	CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS	131
	REFERÊNCIAS.....	133

1 INTRODUÇÃO

1.1 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho foi desenvolver um método de localização de faltas capaz de localizar o trecho da linha e calcular a distância de ocorrência de uma determinada falta em uma linha de transmissão continuamente transposta e de circuito simples com derivações, podendo estas conter cargas conectadas ao longo de sua extensão, ou seja, não somente no final.

O método utiliza os fasores de tensão e corrente pré-falta e pós-falta medidos nos terminais, local e remoto, da linha de transmissão para obter as informações da falta, tais como: o local, a distância, a resistência e o tipo de falta. Desta forma, foi apresentado neste trabalho o processo de obtenção dos fasores de tensão e corrente pré-falta e pós-falta desde a filtragem analógica, através de um circuito passivo, até a filtragem digital, através do filtro baseado no método dos mínimos quadrados em série com um filtro digital passa-baixas de Butterworth.

É apresentado também neste trabalho um algoritmo para estimativa das cargas conectadas nas derivações, pois, uma vez que as cargas variam ao longo do tempo, não é possível conhecer os seus valores no momento da ocorrência da falta, conhecendo somente as referências de carga leve, média e pesada disponibilizados pelos arquivos para programa de fluxo de potência.

1.2 MOTIVAÇÃO

A motivação para a realização deste trabalho se deve ao fato da dificuldade existente na localização de faltas que ocorrem nos sistemas de transmissão com subestações conectadas em derivação.

O sistema elétrico brasileiro é constituído por linhas de transmissão que apresentam um grande número de configurações, sendo que muitas delas são linhas com subestações conectadas em derivação, com cargas conectadas ao final ou ao longo delas.

Devido a esta característica, na ocorrência de uma falta, torna-se difícil a sua localização e conseqüentemente ocorre um aumento no tempo de reparo do defeito acarretando em maiores custos operativos, diminuição da confiabilidade do sistema, prejuízo para as indústrias, que têm seus processos de produção interrompidos ou prejudicados, e para a sociedade como um todo.

Um sistema de transmissão deve garantir uma boa qualidade na entrega de energia aos pontos consumidores, porém está sujeito a diversos eventos indesejáveis que causam faltas, como por exemplo, rompimento de condutores, descargas atmosféricas, rompimento dielétrico do ar por causa da poluição ou queimadas etc. As faltas que ocorrem nas linhas de transmissão estão dentro de duas naturezas, as quais são: temporária ou permanente.

As faltas temporárias são causadas normalmente por descargas atmosféricas e corrigidas pelo religamento automático do sistema, porém sua correta localização é importante para a criação de um histórico confiável sobre as descargas atmosféricas ocorridas na região e estudos de desempenho e localização dos equipamentos de proteção do sistema de transmissão.

As faltas permanentes são causadas por rompimento de condutores, defeitos em isoladores instalados em regiões poluídas ou com queimadas, devido ao rompimento dielétrico do ar, queda de torres, entre outros, e a correção é feita pessoalmente por um funcionário da empresa de transmissão de energia. Neste caso, a localização precisa da falta é muito importante, pois desta forma, o funcionário habilitado a fazer a manutenção pode chegar ao local exato rapidamente, diminuindo assim o tempo total de reparo e de interrupção no fornecimento de energia.

Desta forma, percebe-se a grande importância da correta identificação do local de ocorrência e da distância de ocorrência de uma falta, seja ela permanente ou temporária.

1.3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O estudo de localização de faltas vem se desenvolvendo com o objetivo de minimizar o tempo de reparo dos sistemas de potência, aumentando a confiabilidade e reduzindo os prejuízos causados nas indústrias e na sociedade e também como ferramenta para um levantamento estatístico dos tipos de falta e dos locais de ocorrência de falta.

Vários estudos de métodos de localização de faltas têm sido desenvolvidos e aperfeiçoados de forma a aumentar a precisão do cálculo da distância até o ponto de falta e também do local de falta, visto que os sistemas de potência podem ser constituídos de derivações.

Segundo (KAWADY; STENZEL, 2002) os métodos de localização de faltas podem ser divididos em dois grandes grupos:

- Métodos que têm por base a técnica de ondas trafegantes.
- Métodos que têm por base a técnica de medição dos fasores em regime permanente.

Os métodos que têm por base a medição dos fasores em regime permanente, o qual é utilizado neste trabalho, são em maior número se comparado aos métodos que têm por base a técnica de ondas trafegantes. Isso se deve ao fato de os métodos baseados nos fasores em regime permanente utilizarem os dados registrados dos sinais de tensão e corrente enquanto que os métodos que têm por base a técnica de ondas trafegantes necessitam de equipamentos específicos para que o método possa ser utilizado e ainda, podendo estes métodos, ser utilizados na localização de faltas em linhas que não contém subestações conectadas em derivação, tornando a aplicação do referido método mais cara e às vezes inutilizável.

Os métodos de localização de faltas que tem por base a medição dos fasores em regime permanente são divididos em dois grupos:

- Métodos que utilizam dados apenas do terminal local.

- Métodos que utilizam dados de vários terminais.

Vários métodos de localização de faltas têm sido estudados e desenvolvidos ao longo dos anos, onde alguns exemplos podem ser citados como:

WANG et al. (2008) desenvolveram um algoritmo imune à influência da capacitância *shunt* e à resistência de falta baseado na precondição que o ângulo de fase da componente de sequência negativa da corrente medida em um dos terminais descreve precisamente o ângulo de fase da componente de sequência negativa da corrente de falta e da tensão de falta.

LIN et al. (2007) desenvolveram um método baseado em sistemas de redes neurais, utilizando várias configurações de falta para treinar a rede.

O método apresentado por (FAYBISOVICH e KHOROSHEV, 2008) utiliza o conteúdo espectral do transiente de tensão de alta frequência medido em dois terminais, tornando desnecessária a sincronização dos sinais.

GOPALAKRISHNAN et al. (2000) propuseram um algoritmo que utiliza o método das características para determinar as formas de onda da tensão e da corrente e compará-las com as formas de onda medidas da tensão e da corrente.

O trabalho apresentado por (BRAHMA e GIRGIS, 2004) baseia-se nas variações de tensão causadas pela falta, onde são utilizados no método somente os fasores de tensão medidos em ambos os terminais.

LIAO e KEZUNOVIC (2007) propuseram um método baseado na teoria da estimativa não-linear para identificar os dados medidos com erro e estimar os referidos dados a fim de melhorar a precisão da localização de falta.

FULCZYK et al. (2008) desenvolveram um método de localização de falta para linhas com circuito duplo e compensação série que utiliza subrotinas para calcular a distância e a resistência de falta nos segmentos formados entre as barras e o banco de capacitores série. Os resultados obtidos pelas subrotinas são, então, analisados por um algoritmo para determinar a saída válida dentre as saídas das subrotinas.

O método desenvolvido por (LIANG et al., 2007), utiliza o algoritmo *Particle Swarm Optimization* (PSO) em conjunto com o Método dos Mínimos Quadrados,

combinando a habilidade de convergência ótima global do PSO com a habilidade de convergência rápida e precisa do Método dos Mínimos Quadrados.

FENG, D. et al. (2008) propuseram um método baseado em ondas viajantes, onde são instalados analisadores que medem o tempo de chegada da onda, os quais são convertidos em tempo nas subestações de referência, onde ocorre então, a fusão com pesos dos tempos convertidos.

O método proposto por (FENG, Z. et al., 2008) baseia-se nas ondas trafegantes, onde através de GPS's instalados em todas as subestações o tempo de chegada da onda é determinado e, então, os tempos medidos são utilizados para determinar a distância de falta eliminando a necessidade de se determinar a velocidade de propagação da onda.

Os métodos de localização de faltas para linhas multiterminais são abordados nos trabalhos de (LIU et al., 2008; LIAO, 2008). Tais métodos são explicados com detalhe respectivamente nos subitens 1.3.1 e 1.3.2.

1.3.1 Método desenvolvido em (LIU et al., 2008)

O método desenvolvido em (LIU et al., 2008) aborda a localização de faltas em linhas de transmissão com circuitos duplos ou simples e com derivação. Este método baseia-se na medição dos fasores de tensão e corrente em todos os terminais da linha.

Para a localização de faltas em linhas com vários terminais é aplicada a técnica de localização de faltas em redes de dois terminais. A fim de se determinar o correto local da falta e, por conseguinte, a distância de ocorrência da falta, foi desenvolvido um procedimento que através de índices de localização de faltas tais tarefas são realizadas.

A técnica de localização de faltas em linhas com dois terminais utiliza as equações de propagação das ondas de tensão e corrente ao longo da linha para determinar as

tensões e correntes no ponto da falta, tendo como dados iniciais os fasores de tensão e corrente medidos em todos os terminais da linha.

Considerando o circuito apresentado na figura 1.1, as tensões e correntes a uma distância x do terminal remoto podem ser determinadas pelas seguintes equações:

$$V_x = Ae^{\gamma x} + Be^{-\gamma x} \quad (1.1)$$

$$I_x = (Ae^{\gamma x} + Be^{-\gamma x}) / Z_c \quad (1.2)$$

Onde A e B são os parâmetros do quadripolo de transmissão, $\gamma = \sqrt{zy}$ é a constante de propagação e $Z_c = \sqrt{z/y}$ é a impedância característica da linha. z é a impedância e y é a admitância sequenciais da linha.

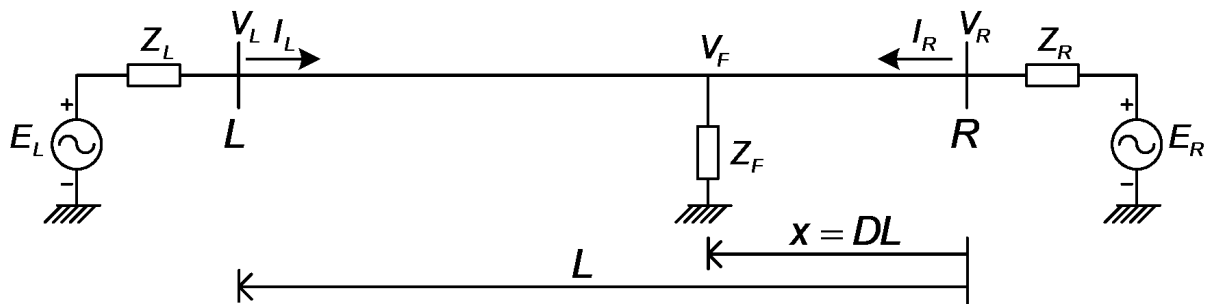


Figura 1.1 – Linha de transmissão de circuito simples com falta no ponto F . (LIU et al., 2008)

Para a determinação da tensão no ponto da falta F , utiliza-se a eq.(1.1), onde os parâmetros A e B são determinados com os dados de tensão e corrente medidos nos dois terminais, L e R , obtendo-se as seguintes equações:

$$V_{x,R} = \frac{1}{2}(V_R + Z_c I_R)e^{\gamma x} + \frac{1}{2}(V_R - Z_c I_R)e^{-\gamma x} \quad (1.3)$$

$$V_{x,L} = \frac{1}{2}(V_L + Z_c I_L)e^{-\gamma l} e^{\gamma x} + \frac{1}{2}(V_L - Z_c I_L)e^{\gamma l} e^{-\gamma x} \quad (1.4)$$

A tensão $V_{x,R}$ é a tensão no ponto da falta calculada com os dados de tensão e corrente do terminal R e $V_{x,L}$ é a tensão no ponto da falta calculada com os dados de tensão e corrente do terminal L .

Através das equações (1.3) e (1.4) obtém-se a eq.(1.5), onde os cálculos mais detalhados encontram-se na referência (JIANG et al., 2000):

$$D = \frac{\ln(N/M)}{2\gamma l} \quad (1.5)$$

Onde D é o índice de localização da falta por unidade de comprimento, o qual multiplicado por l , que é a distância entre os terminais L e R , dá a distância de falta medida a partir do terminal R .

N e M são dados por:

$$N = \frac{1}{2}(V_R - Z_c I_R) - \frac{1}{2}(V_L - Z_c I_L)e^{\gamma l} \quad (1.6)$$

$$M = \frac{1}{2}(V_L + Z_c I_L)e^{-\gamma l} - \frac{1}{2}(V_R + Z_c I_R) \quad (1.7)$$

Segundo (JIANG et al., 2000) o índice D será indeterminado quando nenhuma falta ocorrer ou quando a falta ocorrer externa à linha sendo analisada.

Para aplicar o método descrito acima para uma linha com derivações, como mostra a figura 1.2, considera-se o ponto P_1 como terminal virtual e também se define a distância entre o ponto P_1 e o terminal R , L_R , como distância de referência para os índices de localização de falta, D . Os índices D são calculados para todos os N terminais.

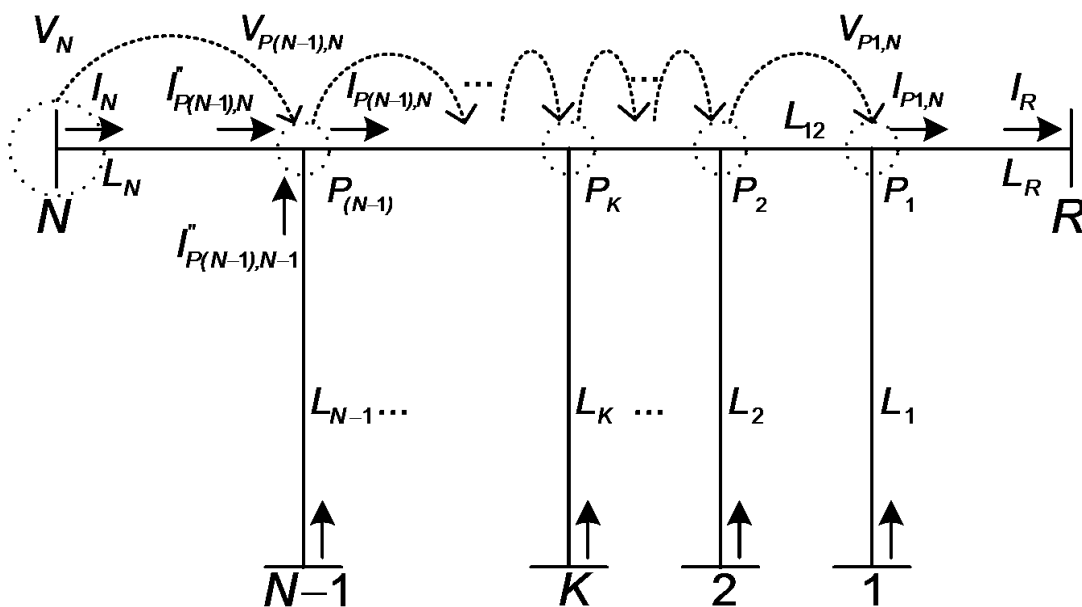


Figura 1.2 – Linha com várias derivações. (LIU et al., 2008)

Na figura 1.3 é apresentado o procedimento que deve ser realizado para encontrar o local e a distância de falta:

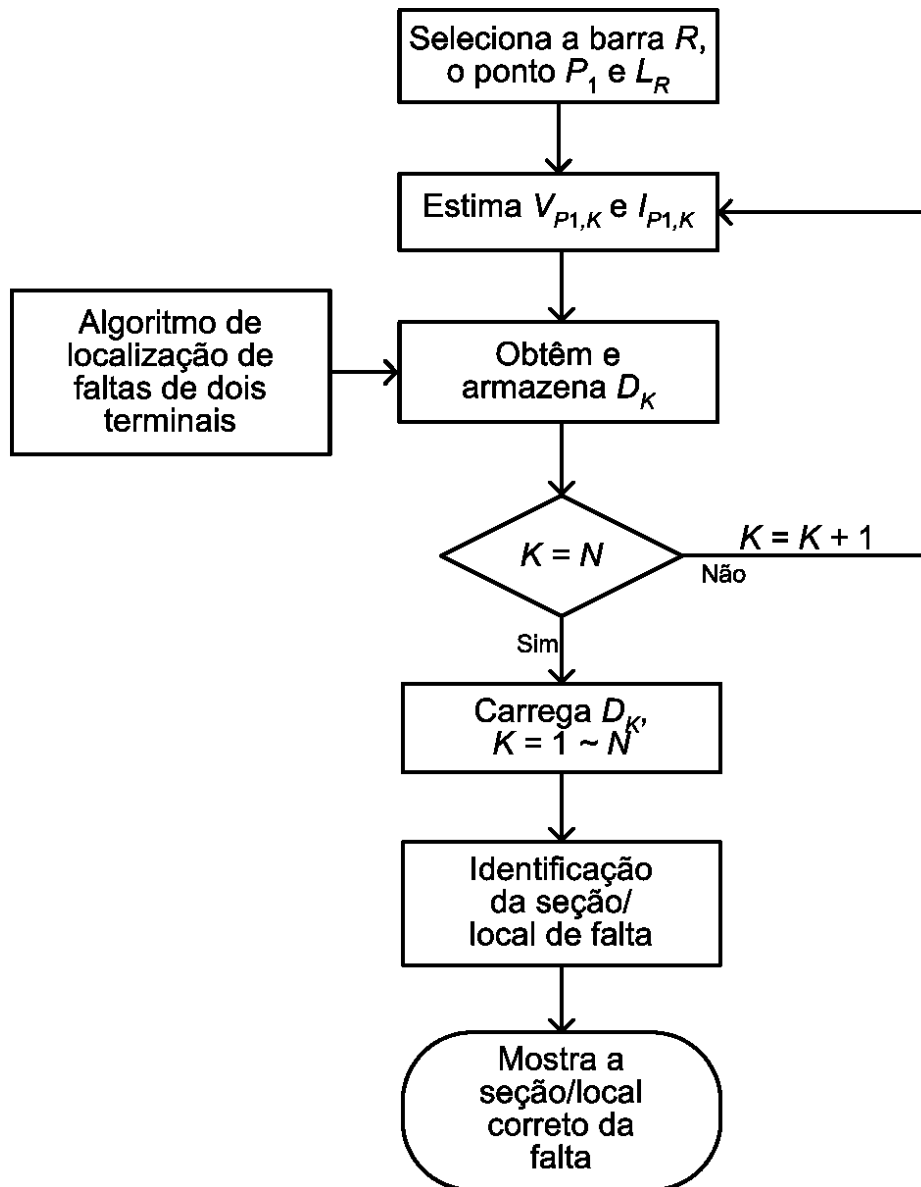


Figura 1.3 – Procedimento para determinação do local e da distância de falta. (LIU et al., 2008)

Calculados os índices D para todos os N terminais, eles são analisados, para determinar o local da falta e, por conseguinte a distância de falta, segundo o procedimento descrito na figura 1.4:

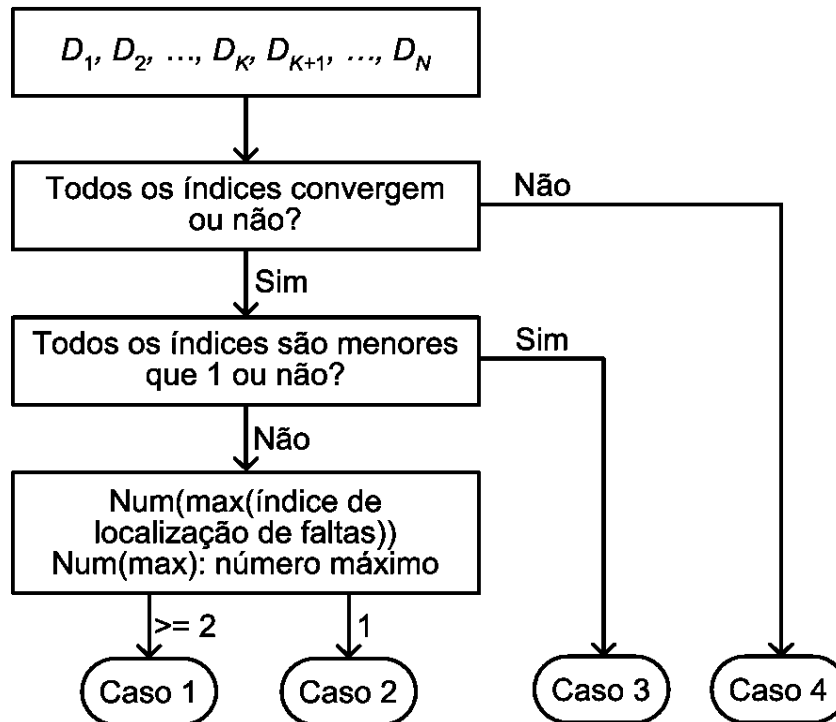


Figura 1.4 – Análise dos índices D obtidos para os N terminais. (LIU et al., 2008)

Na figura 1.4:

- **Caso 1:** Seção da falta ($P_K - P_{(K+1)}$) e local da falta D_{K+1} ;
- **Caso 2:** Seção da falta (Barra $K - P_K$) e local da falta D_K ;
- **Caso 3:** Seção da falta (Barra $R - P_1$) e local da falta D_1 ;
- **Caso 4:** Falta externa.

Como pode ser observado na figura 1.4, o local de falta é obtido pela combinação dos valores obtidos para os índices D .

1.3.2 Método desenvolvido em (LIAO, 2008)

O método desenvolvido em (LIAO, 2008) utiliza técnicas baseadas na matriz de impedâncias da linha e nas medições de tensão em um ou em dois terminais na

localização de faltas em linhas com circuito simples, não sendo necessárias medições de correntes.

Na localização de faltas com dados obtidos a partir de dois terminais é utilizada a seguinte equação:

$$m = \frac{B_K^{(1)} - d_{KL} B_L^{(1)}}{d_{KL} C_L^{(1)} - C_K^{(1)}} \quad (1.8)$$

Na eq.(1.8) a variável m é a distância de falta em pu, B e C são constantes obtidas a partir dos parâmetros da rede, cujas equações estão mostradas em detalhes no apêndice A da referência (LIAO, 2008), K e L são, respectivamente, os terminais K e L da linha, o número 1 em parêntesis representa a sequência positiva, a variável d_{KL} é descrita conforme a seguinte equação:

$$d_{KL} = \frac{E_K^{(1)} - E_K^{(1)0}}{E_L^{(1)} - E_L^{(1)0}} = \frac{\Delta E_K^{(1)}}{\Delta E_L^{(1)}} \quad (1.9)$$

Onde $E_K^{(1)}$ é a tensão de sequência positiva medida no terminal K após a ocorrência da falta, $E_K^{(1)0}$ é a tensão de sequência positiva medida no terminal K antes da ocorrência da falta, $E_L^{(1)}$ é a tensão de sequência positiva medida no terminal L após a ocorrência da falta e $E_L^{(1)0}$ é a tensão de sequência positiva medida no terminal L antes da ocorrência da falta.

No caso de haver medições de tensão em somente um terminal, como por exemplo, no terminal K é necessário conhecer o tipo de falta que ocorreu, falta fase-terra, trifásica, dupla-fase ou dupla-fase-terra.

Para falta fase-terra é utilizada a seguinte equação para a localização da falta:

$$m = \frac{B_K^{(2)} - g B_K^{(0)}}{g C_K^{(0)} - C_K^{(2)}} \quad (1.10)$$

Na eq.(1.10) a variável m é a distância de falta em pu, B e C são constantes obtidas a partir dos parâmetros da rede, cujas equações estão mostradas em detalhes no apêndice A da referência (LIAO, 2008), os números 2 e 0 em parêntesis

representam a sequência negativa e zero respectivamente, a variável g é descrita pela seguinte equação:

$$g = \frac{E_K^{(2)}}{E_K^{(0)}} \quad (1.11)$$

Onde $E_K^{(2)}$ é a tensão de sequência negativa medida no terminal K após a ocorrência da falta e $E_K^{(0)}$ é a tensão de sequência zero medida no terminal K após a ocorrência da falta.

Para falta trifásica a seguinte equação é utilizada:

$$E_K^{(1)} = E_K^{(1)0} - \frac{(B_K^{(1)} + C_K^{(1)}m)E_r^{(1)0}}{R_f + A_0^{(1)} + A_1^{(1)}m + A_2^{(1)}m^2} \quad (1.12)$$

Na eq.(1.12) as variáveis R_f , que é a resistência de falta, $E_r^{(1)0}$, que é a tensão de sequência positiva no ponto da falta e m são desconhecidas e, então, a distância de falta, representada pela variável m , deve ser obtida resolvendo a eq.(1.12) iterativamente. A_0 , A_1 e A_2 são constantes obtidas a partir dos parâmetros da rede, cujas equações estão mostradas em detalhes no apêndice A da referência (LIAO, 2008).

Para falta fase-fase a seguinte equação é utilizada para a determinação da distância de falta:

$$E_K^{(1)} = E_K^{(1)0} - \frac{(B_K^{(1)} + C_K^{(1)}m)E_r^{(1)0}}{R_f + (A_0^{(1)} + A_0^{(2)}) + (A_1^{(1)} + A_1^{(2)})m + (A_2^{(1)} + A_2^{(2)})m^2} \quad (1.13)$$

A distância de falta é determinada da mesma maneira que para a falta trifásica, ou seja, através da resolução iterativa da eq.(1.13).

Para falta fase-fase-terra a distância de falta é determinada pela seguinte equação:

$$g = \frac{B_K^{(2)} + mC_K^{(2)}}{B_K^{(0)} + mC_K^{(0)}} * \frac{A_0^{(0)} + A_1^{(0)}m + A_2^{(0)}m^2 + 3R_f}{A_0^{(2)} + A_1^{(2)}m + A_2^{(2)}m^2} \quad (1.14)$$

A distância de falta é obtida utilizando iteração, cujos cálculos estão detalhados no apêndice E da referência (LIAO, 2008).

No caso de se utilizar o modelo de linha com parâmetros distribuídos as equações para a localização da falta são similares as equações obtidas anteriormente para o caso de parâmetros concentrados.

A rede da figura 1.5 foi utilizada na referência (LIAO, 2008) a fim de testar o algoritmo proposto.

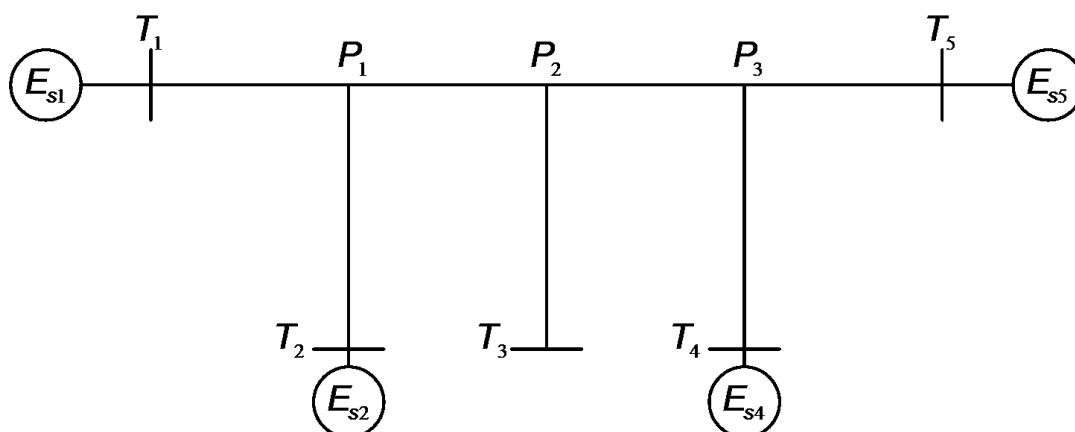


Figura 1.5 – Rede utilizada para teste da metodologia proposta. (LIAO, 2008)

Os resultados obtidos por (LIAO, 2008) mostram que para o método que utiliza as medições de tensão em dois terminais é capaz de localizar faltas ocorridas entre as derivações, T_1 - P_1 , P_1 - P_2 , P_2 - P_3 e P_3 - T_5 , não sendo capaz de localizar faltas ocorridas nas derivações.

Para a localização de faltas nas derivações deve-se utilizar, portanto, com base nos resultados obtidos por (LIAO, 2008), o método que utiliza as medições de tensão em apenas um terminal, onde mais de um resultado possível para a falta é encontrado, devendo segundo (LIAO, 2008), realizar os cálculos para cada um dos terminais e depois por intersecção dos resultados, determinar o possível, ou os possíveis, local da falta.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho está estruturado da seguinte forma:

- **Capítulo 1:** Apresenta a introdução e a revisão bibliográfica pertinente à localização de faltas.
- **Capítulo 2:** Apresenta o processo de obtenção dos fasores de tensão e corrente pré-falta e pós-falta, o qual é constituído pelo processo de filtragem analógica, pela filtragem digital e pela determinação do instante da falta.
- **Capítulo 3:** É apresentado o método de localização de faltas proposto, o qual é composto, além do processo de obtenção dos fasores, da estimativa dos equivalentes dos geradores e da determinação do tipo de falta, pelo novo algoritmo de localização de faltas e pelo algoritmo de estimativa das cargas.
- **Capítulo 4:** Neste capítulo é apresentada a rede que foi simulada para avaliação do método proposto. São apresentados também os resultados das simulações do método de localização de faltas proposto, frente a diversos fatores, tais como: variação da distância de falta, variação do tipo de falta, variação da resistência de falta, erros nos fasores de tensão e corrente pré-falta e pós-falta e erros nos parâmetros da linha.
- **Capítulo 5:** São apresentadas as conclusões sobre o método proposto.

2 PROCESSAMENTO DOS SINAIS DE TENSÃO E CORRENTE

No algoritmo proposto neste trabalho são utilizados os fasores de tensão e corrente medidos em dois terminais com o objetivo de calcular a distância e o trecho de ocorrência da falta.

Na ocorrência de uma falta ocorrem reflexões das ondas de tensão e corrente nos terminais da linha, causando o aparecimento de harmônicas que caracterizam o regime transitório.

Devido à necessidade de se obter os fasores de tensão e corrente após a ocorrência da falta, tais sinais devem ser filtrados, uma vez que na ocorrência de uma falta os dispositivos de proteção atuam dentro de alguns ciclos, não havendo tempo suficiente para o amortecimento das harmônicas.

Os estágios de obtenção dos fasores de tensão e corrente estão descritos na figura 2.1 a seguir:

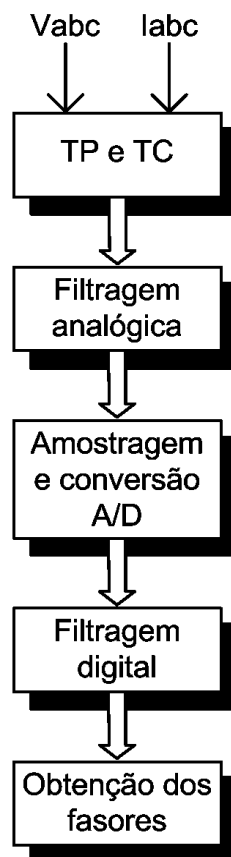


Figura 2.1 – Estágios para obtenção dos fasores de tensão e corrente

No primeiro estágio, os sinais de tensão e corrente são passados pelo transformador de potencial (TP) e pelo transformador de corrente (TC), respectivamente, de forma a ajustar os sinais de tensão e corrente a níveis mais baixos, ou seja, a níveis que sejam possíveis de serem utilizados em medidores.

No segundo estágio, é feita a filtragem analógica dos sinais de tensão e corrente através da utilização de filtro passivo (RLC) ou ativo (Amplificadores operacionais) passa-baixas com o objetivo de anular ou atenuar o erro de "aliasing" (OGATA, 1995). O erro de "aliasing" ocorre quando um sinal a ser amostrado possui harmônicas de ordem superior a $N/2$, onde N é número de amostras por ciclo da fundamental (OGATA, 1995). Os procedimentos de filtragem analógica estão descritos em detalhes no item 2.1.

No terceiro estágio, é realizada a amostragem dos sinais de tensão e corrente e logo em seguida é realizada a conversão analógico-digital do sinal amostrado.

No quarto estágio, os sinais amostrados passam por uma filtragem digital com o objetivo de extrair a componente fundamental dos sinais de tensão e corrente. A filtragem digital pode ser baseada em métodos como a transformada discreta de Fourier ou o método dos mínimos quadrados, o qual foi utilizado neste trabalho. A filtragem digital de sinais está mais bem detalhada no item 2.2, onde o método dos mínimos quadrados está explicado em detalhes.

No quinto e último estágio, após passar pelo filtro digital os dados obtidos (módulo e fase das tensões e correntes a 60 Hz) são, então, analisados a fim de se extrair o módulo e a fase dos sinais de tensão e corrente antes da ocorrência da falta e o módulo e a fase dos sinais de tensão e corrente após a ocorrência da falta. Este estágio está explicado em detalhes no item 2.3.

2.1 FILTRAGEM ANALÓGICA DE SINAIS

A filtragem analógica dos sinais de tensão e corrente é um importante passo no processamento de tais sinais devido ao erro de "aliasing" (OGATA, 1995) que pode

ocorrer ao se amostrar um sinal que contenha harmônicas de ordem superior a $N/2$, onde N é o número de amostras por ciclo da fundamental.

O erro de "aliasing" consiste em obter os dados de uma componente do sinal, contendo certa frequência, de forma que tais dados também podem representar outra componente do sinal contendo uma frequência diferente, não sendo, portanto, possível haver distinção entre essas componentes (OGATA, 1995).

Para um melhor entendimento do fenômeno citado acima, considere um sinal composto de duas componentes, uma de 60 Hz e outra de 180 Hz, conforme é apresentado na figura 2.2:

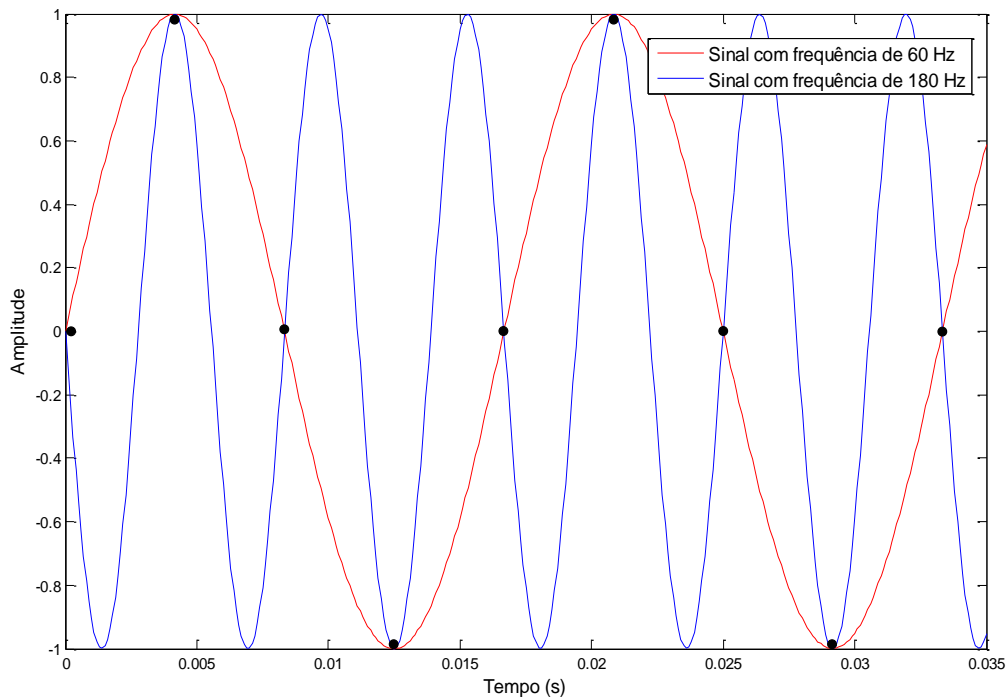


Figura 2.2 – Amostragem de um sinal com componentes de 60 Hz e 180 Hz

O sinal composto pelas componentes da figura 2.2 é amostrado a uma taxa de 4 amostras por ciclo de 60 Hz ou a uma frequência de 240 Hz, como mostram as bolinhas pretas. Pelo teorema de Nyquist, tal sinal deveria ter sido amostrado a uma taxa de 360 Hz ou 6 amostras por ciclo de 60 Hz para que não houvesse erro de "aliasing", que como pode ser observado na figura 2.2, a componente de 180 Hz ou harmônica de 3ª ordem, ao ser amostrada, pode ser considerada como uma componente de 60 Hz, causando erro ao se reconstruir o sinal.

No algoritmo de localização de faltas proposto neste trabalho, são utilizados sinais de tensão e corrente, amostrados a uma taxa de 16 amostras por ciclo de 60 Hz ou amostrados com uma frequência de 960 Hz.

Para evitar o erro de "aliasing", neste trabalho foi utilizado um filtro passa-baixas passivo de Butterworth, cuja metodologia e projeto são explicados nos itens 2.1.1 e 2.1.2 respectivamente.

A filtragem analógica de sinais é definida como sendo a convolução do sinal de entrada com a função de transferência do filtro no domínio do tempo ou como sendo, simplesmente, a multiplicação do sinal de entrada pela função de transferência do filtro no domínio da frequência, como mostra a eq.(2.1):

$$Y(s) = T(s)X(s) \quad (2.1)$$

Onde:

$Y(s)$ é a saída do filtro;

$T(s)$ é a função de transferência do filtro;

$X(s)$ é o sinal de entrada.

A função de transferência do filtro $T(s)$ é dada pela seguinte equação:

$$T(s) = \frac{a_M s^M + a_{M-1} s^{M-1} + \dots + a_0}{s^N + b_{N-1} s^{N-1} + \dots + b_0} \quad (2.2)$$

Na eq.(2.2), a ordem do filtro é definida pelo grau do denominador, N . Para que o filtro seja estável, o grau do numerador, M , deve ser menor ou igual ao grau do denominador (SEDRA e SMITH, 2000).

2.1.1 Filtro analógico de Butterworth

No projeto de um filtro passa-baixas as seguintes especificações devem ser fornecidas: ω_p , que é a frequência da borda de passagem; $A_{m\acute{a}x}$, que é o desvio máximo em dB que haverá na transmissão na faixa de passagem; ω_s , que é a frequência da borda da faixa de bloqueio; e $A_{m\acute{i}n}$, que é a atenuação mínima que os sinais deverão sofrer na faixa de bloqueio. A figura 2.3 apresenta as especificações do filtro:

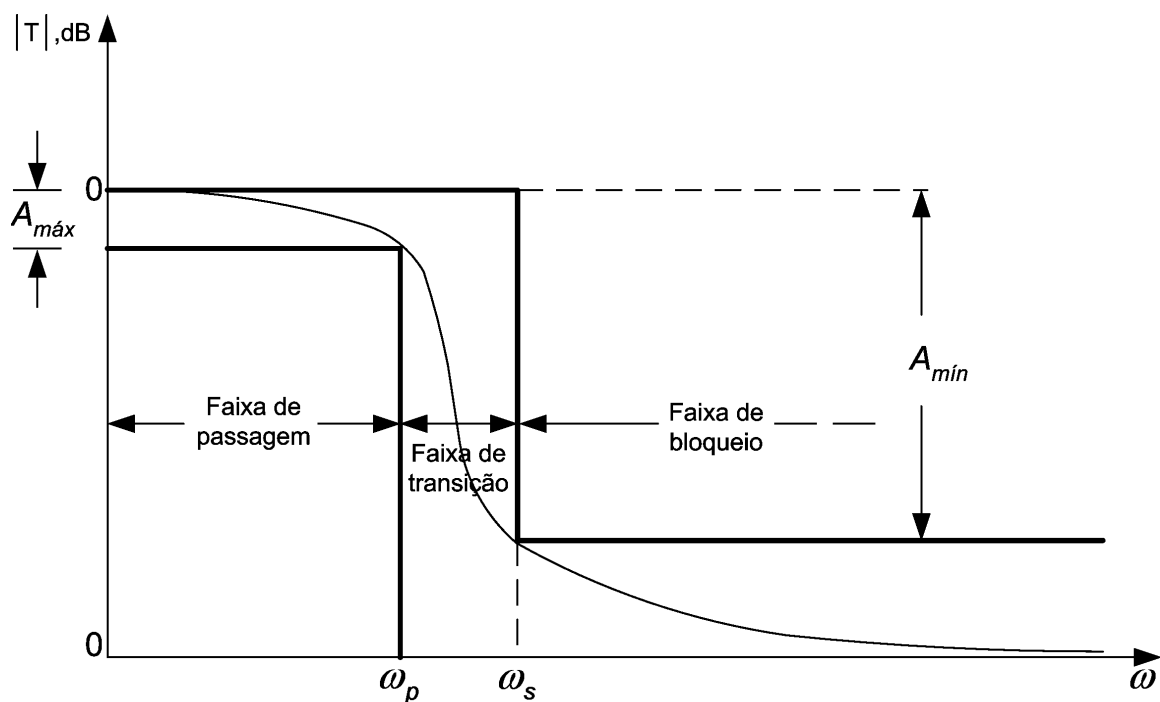


Figura 2.3 – Parâmetros de especificação de um filtro passa-baixas.

As especificações citadas acima são, então, utilizadas no projeto de um filtro passa-baixas de Butterworth, que contém uma curva para o módulo da função de transferência parecida com a da figura 2.3.

A eq.(2.3) descreve o módulo da função de transferência do filtro de Butterworth de n-ésima ordem:

$$|T(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + \epsilon^2 \left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^{2N}}} \quad (2.3)$$

Em $\omega = \omega_p$, ou seja, na borda da faixa de passagem:

$$|T(j\omega_p)| = \frac{1}{\sqrt{1+\epsilon^2}} \quad (2.4)$$

O parâmetro ϵ determina a variação máxima da transmissão na faixa de passagem (SEDRA e SMITH, 2000).

A resposta em frequência do módulo do filtro de Butterworth é mostrada na figura 2.4:

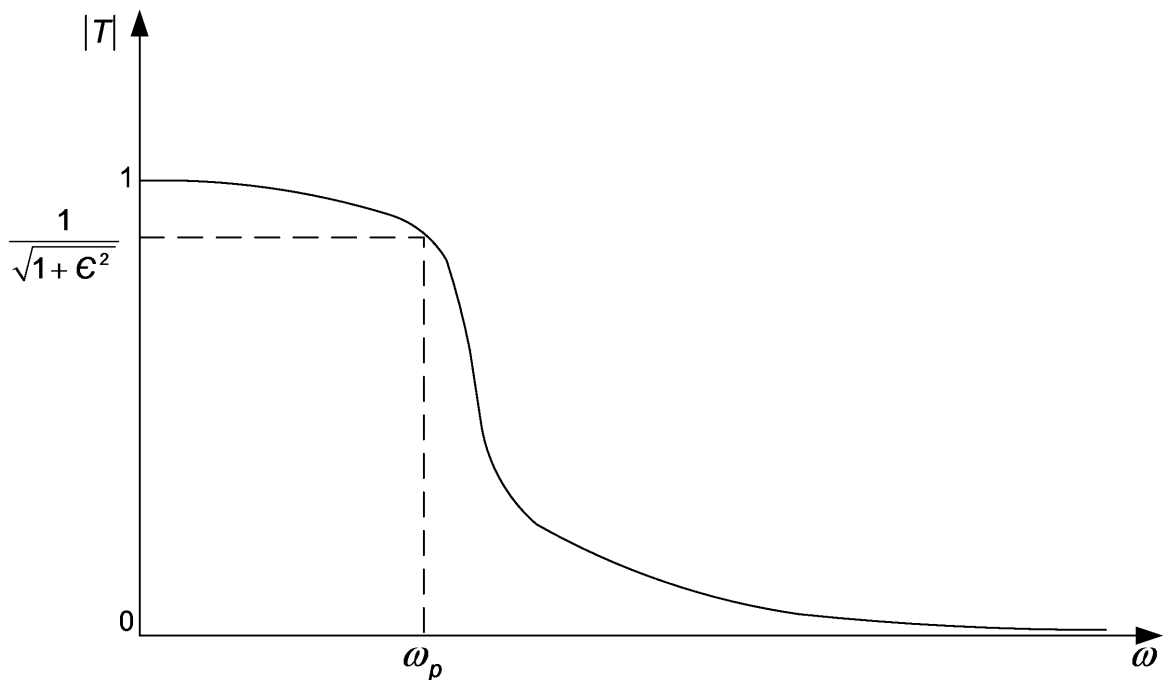


Figura 2.4 – Resposta em frequência do módulo da função de transferência. (SEDRA e SMITH, 2000).

Como pode ser observado na figura 2.4,

$$A_{m\acute{a}x} = 20 \log \sqrt{1+\epsilon^2} \quad (2.5)$$

Uma vez que $A_{m\acute{a}x}$ é uma especificação do projeto, a eq.(2.5) pode ser reescrita de forma a isolar o parâmetro ϵ , conforme eq.(2.6):

$$\epsilon = \sqrt{10^{A_{m\acute{a}x}/10} - 1} \quad (2.6)$$

Na borda da faixa de bloqueio, ou seja, em $\omega = \omega_s$, o filtro de Butterworth apresenta a seguinte equação para a atenuação:

$$A(\omega_s) = 10 \log \left[1 + \epsilon^2 \left(\frac{\omega_s}{\omega_p} \right)^{2N} \right] \quad (2.7)$$

Através da especificação de $A_{mín}$ e da eq.(2.7) é possível determinar a ordem do filtro, onde a ordem do filtro é determinada pelo menor valor inteiro de N que produz $A(\omega_s) \geq A_{mín}$ (SEDRA e SMITH, 2000).

Obtido o valor de N , os pólos do filtro de Butterworth podem ser determinados graficamente, como mostra a figura 2.5:

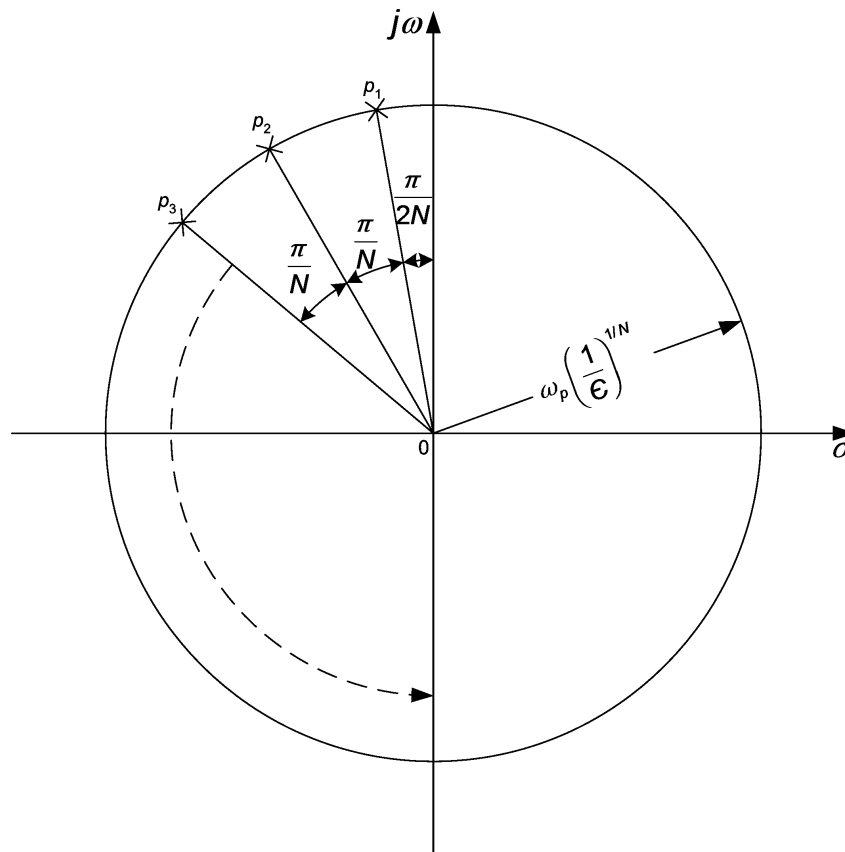


Figura 2.5 – Gráfico para determinação dos pólos do filtro de Butterworth. (SEDRA e SMITH, 2000).

Nota-se do gráfico da figura 2.5 que todos os pólos têm a mesma distância radial, tendo desta forma a mesma frequência, dada pela seguinte equação:

$$\omega_0 = \omega_p \left(\frac{1}{\epsilon} \right)^{\frac{1}{N}} \quad (2.8)$$

Obtidos os pólos, pode-se escrever a função de transferência do filtro de Butterworth, representada pela eq.(2.9):

$$T(s) = \frac{K\omega_0^N}{(s - p_1)(s - p_2)\dots(s - p_N)} \quad (2.9)$$

Onde K é o ganho cc do filtro.

2.1.2 Projeto de filtros passa-baixas analógicos passivos

Neste trabalho foi utilizado um filtro passa-baixas passivo de Butterworth, ou seja, um filtro composto somente de elementos passivos: resistores, capacitores e indutores.

No projeto deste filtro, a função de transferência foi obtida através do método de Butterworth apresentado no item 2.1.1. Através da análise da função de transferência, observa-se que a mesma pode ser implementada com o cascadeamento de filtros de primeira e segunda ordem, colocando o filtro de menor frequência de passagem antes do filtro de maior frequência de passagem.

Ao cascadear filtros de primeira e segunda ordem, a função de transferência resultante será diferente da função de transferência obtida pelo método de Butterworth, devendo, portanto, o circuito ser ajustado de forma a obter uma função de transferência mais próxima possível da função de transferência obtida pelo referido método.

A fim de esclarecer o método descrito anteriormente, o projeto do filtro passivo utilizado neste trabalho será utilizado como exemplo:

O primeiro passo do projeto do filtro é definir os parâmetros mencionados no item 2.1.1:

$$A_{m\acute{a}x} = 1dB, A_{m\acute{i}n} = 20dB, f_p = 300Hz, f_s = 800Hz \text{ e } K = 1.$$

O segundo passo é calcular o parâmetro ϵ através da eq.(2.6) como segue:

$$\epsilon = \sqrt{10^{A_{m\acute{a}x}/10} - 1} = \sqrt{10^{1/10} - 1} = 0,5088$$

O terceiro passo é encontrar a ordem do filtro que satisfaça a condição $A(\omega_s) \geq A_{m\acute{i}n}$.

A ordem do filtro é então encontrada testando os valores de N na eq.(2.7) como segue:

Escolhendo inicialmente $N = 2$, tem-se:

$$A(800) = 10 \log \left[1 + 0,5088^2 \left(\frac{800}{300} \right)^4 \right] = 11,4894 < A_{m\acute{i}n}$$

Para $N = 3$:

$$A(800) = 10 \log \left[1 + 0,5088^2 \left(\frac{800}{300} \right)^6 \right] = 19,7355 \approx A_{m\acute{i}n}$$

Então, a ordem do filtro será igual a 3.

O quarto passo é calcular os pólos do filtro. Utilizando a análise gráfica apresentada no item 2.1.1, figura 2.5, tem-se:

O ângulo de p_1 com relação ao eixo $j\omega$ será: $\frac{\pi}{2N} = \frac{\pi}{6}$

O ângulo de p_2 com relação ao eixo $j\omega$ será: $\frac{\pi}{N} + \frac{\pi}{2N} = \frac{\pi}{2}$

O ângulo de p_3 com relação ao eixo $j\omega$ será: $\frac{\pi}{N} + \frac{\pi}{N} + \frac{\pi}{2N} = \frac{2\pi}{3}$

Os pólos estão dispostos, graficamente, na figura 2.6:

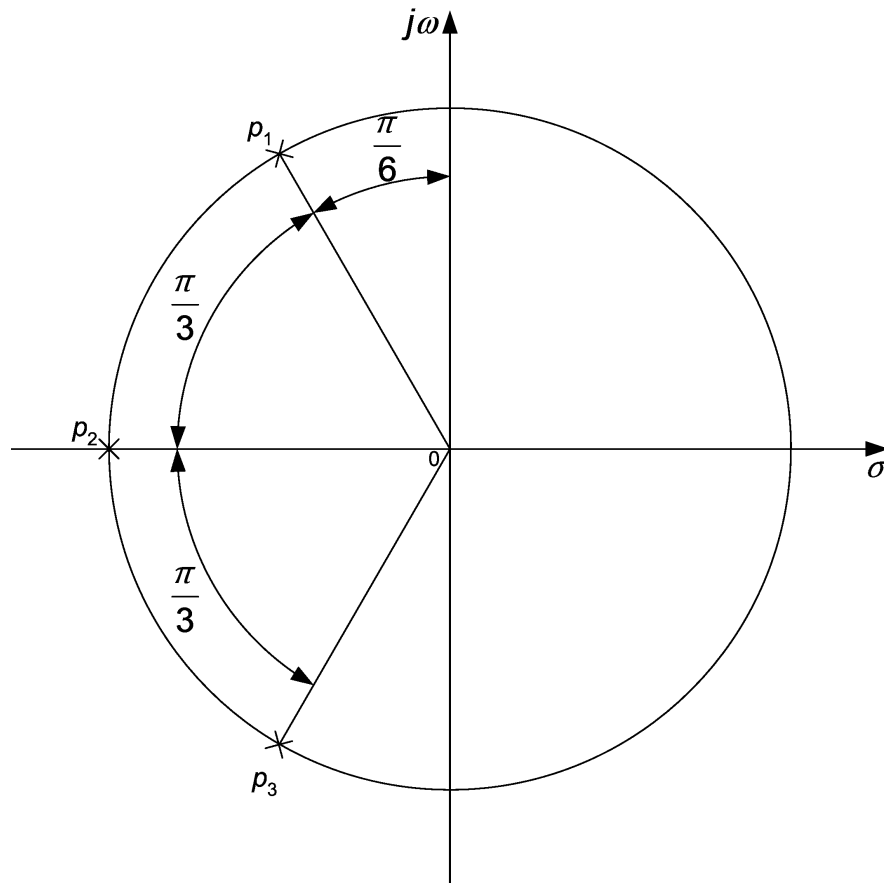


Figura 2.6 – Pólos do filtro de Butterworth

O módulo dos pólos é dado pela eq.(2.8):

$$\omega_0 = \omega_p \left(\frac{1}{\epsilon} \right)^{\frac{1}{N}} = 2\pi 300 \left(\frac{1}{0,5088} \right)^{\frac{1}{3}} = 2,3611 \cdot 10^3 \text{ (rad/s)}$$

Com o auxílio do gráfico da figura 2.6, pode-se calcular os valores dos pólos como segue:

$$p_1 = \omega_0 \left[-\cos\left(\frac{\pi}{3}\right) + j \sin\left(\frac{\pi}{3}\right) \right] = \omega_0 \left(-\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right)$$

$$p_2 = -\omega_0$$

$$p_3 = p_1^* = \omega_0 \left(-\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \right)$$

Obtidos os pólos a função de transferência pode, então, ser escrita:

$$T(s) = \frac{\omega_0^3}{(s - p_1)(s - p_2)(s - p_3)} \quad (2.10)$$

Expandindo a função de transferência:

$$T(s) = \frac{\omega_0^3}{(s + \omega_0)(s^2 + \omega_0 s + \omega_0)} \quad (2.11)$$

Nota-se a partir da função de transferência, apresentada pela eq.(2.11), que ela pode ser obtida pelo cascadeamento de um filtro de 1ª ordem, tendo a função de transferência descrita pela eq.(2.12), com um filtro de 2ª ordem, tendo a função de transferência descrita pela eq.(2.13).

$$T_1(s) = \frac{\omega_0}{s + \omega_0} \quad (2.12)$$

$$T_2(s) = \frac{\omega_0^2}{s^2 + \omega_0 s + \omega_0^2} \quad (2.13)$$

O quinto passo é, com base nas funções de transferência descritas pela eq.(2.12) e eq.(2.13), definir os circuitos passivos que implementam tais funções.

O circuito apresentado na figura 2.7, é um circuito de um filtro de 1ª ordem, que implementa a função de transferência descrita pela eq.(2.12),

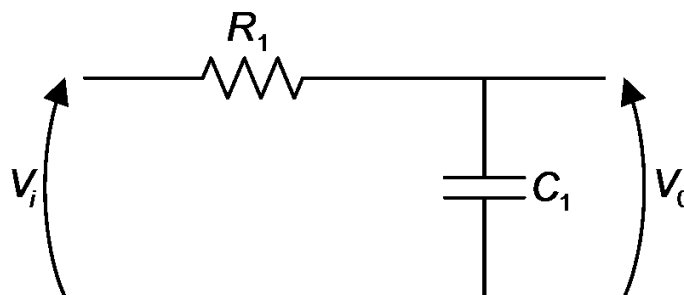


Figura 2.7 – Circuito de um filtro de 1ª ordem

cuja função de transferência é a seguinte:

$$T_{c1}(s) = \frac{1/R_1 C_1}{s + 1/R_1 C_1} \quad (2.14)$$

Para implementar a função de transferência descrita pela eq.(2.13), o circuito mostrado na figura 2.8 é utilizado,

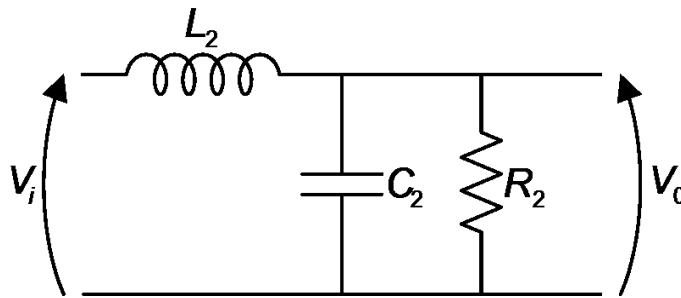


Figura 2.8 – Circuito de um filtro de 2ª ordem

cuja função de transferência é a seguinte:

$$T_{c2}(s) = \frac{1/(L_2 C_2)}{s^2 + (1/R_2 C_2)s + 1/(L_2 C_2)} \quad (2.15)$$

O sexto passo é cascatear os dois circuitos apresentados pelas figuras 2.7 e 2.8, colocando o filtro de 1ª ordem antes do filtro de 2ª ordem, a fim de construir um filtro de 3ª ordem, obtendo-se o circuito mostrado pela figura 2.9,

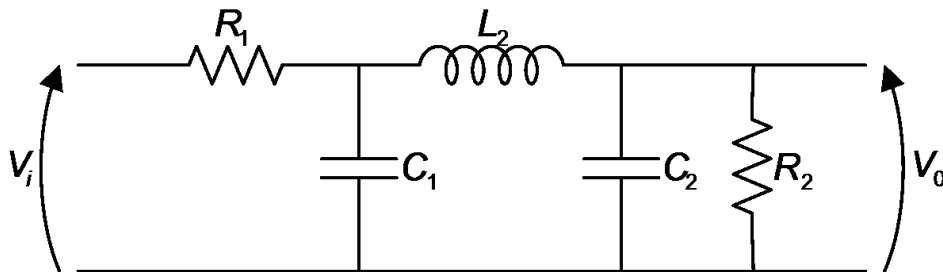


Figura 2.9 – Circuito de um filtro de 3ª ordem obtido a partir do cascateamento dos circuitos das figuras 2.7 e 2.8

cuja função de transferência é a seguinte:

$$T_{c3}(s) = \frac{1/(R_1 L_2 C_1 C_2)}{s^3 + \left(\frac{1}{(R_1 C_1)} + \frac{1}{(R_2 C_2)} \right) s^2 + \left(\frac{1}{(L_2 C_1)} + \frac{1}{(L_2 C_2)} + \frac{1}{(R_1 C_1 R_2 C_2)} \right) s + \frac{1}{(R_2 L_2 C_1 C_2)} + \frac{1}{(R_1 L_2 C_1 C_2)}} \quad (2.16)$$

O sétimo passo é calcular os valores dos componentes: R_1 , C_1 , R_2 , C_2 e L_2 .

Observa-se que, para a eq.(2.16) descrever a eq.(2.11), a resistência R_2 deve ser muito maior que a resistência R_1 .

Com base nesta condição, podem-se obter os valores dos componentes, R_1 , C_1 , R_2 , C_2 e L_2 através da comparação entre a eq.(2.12) com a eq.(2.14) e da comparação entre a eq.(2.13) e eq.(2.15), sendo a eq.(2.16) útil para verificar se o circuito está descrevendo adequadamente a função de transferência calculada pelo método de Butterworth.

Definindo $L_2 = 0,5\text{H}$ e comparando a eq.(2.13) com a eq.(2.15), tem-se:

$$\frac{1}{L_2 C_2} = \omega_0^2 = 5,5748 \cdot 10^6$$

E, então:

$$C_2 = 0,3587 \mu\text{F}$$

Ainda, comparando a eq.(2.13) com a eq.(2.15), tem-se que:

$$\frac{1}{R_2 C_2} = \omega_0 = 2,3611 \cdot 10^3$$

E, então:

$$R_2 = 1,1808 \text{k}\Omega$$

Considerando que R_2 seja 1000 vezes maior que R_1 , tem-se:

$$R_1 = 1,1808 \Omega$$

Comparando a eq.(2.12) com a eq.(2.14), segue que:

$$\frac{1}{R_1 C_1} = \omega_0 = 2,3611 \cdot 10^3$$

E, então:

$$C_1 = 358,7 \mu\text{F}$$

Substituindo os valores dos componentes na eq.(2.16), tem-se:

$$T_{c3}(s) = \frac{1,3163 \cdot 10^{10}}{s^3 + 4722s^2 + 1,1155 \cdot 10^7 s + 1,3177 \cdot 10^{10}} \quad (2.17)$$

Substituindo o valor de ω_0 na eq.(2.11), tem-se:

$$T(s) = \frac{1,3163 \cdot 10^{10}}{s^3 + 4722s^2 + 1,1150 \cdot 10^7 s + 1,3163 \cdot 10^{10}} \quad (2.18)$$

Comparando a eq.(2.17) com a eq.(2.18), concluí-se que o circuito projetado descreve bem a função de transferência obtida pelo método de Butterworth.

Para efeito de comparação, a figura 2.10 mostra as curvas obtidas injetando-se um sinal de entrada com fundamental de 60 Hz e uma harmônica de 900 Hz na função de transferência obtida pelo método de Butterworth e na função de transferência obtida pelo circuito:

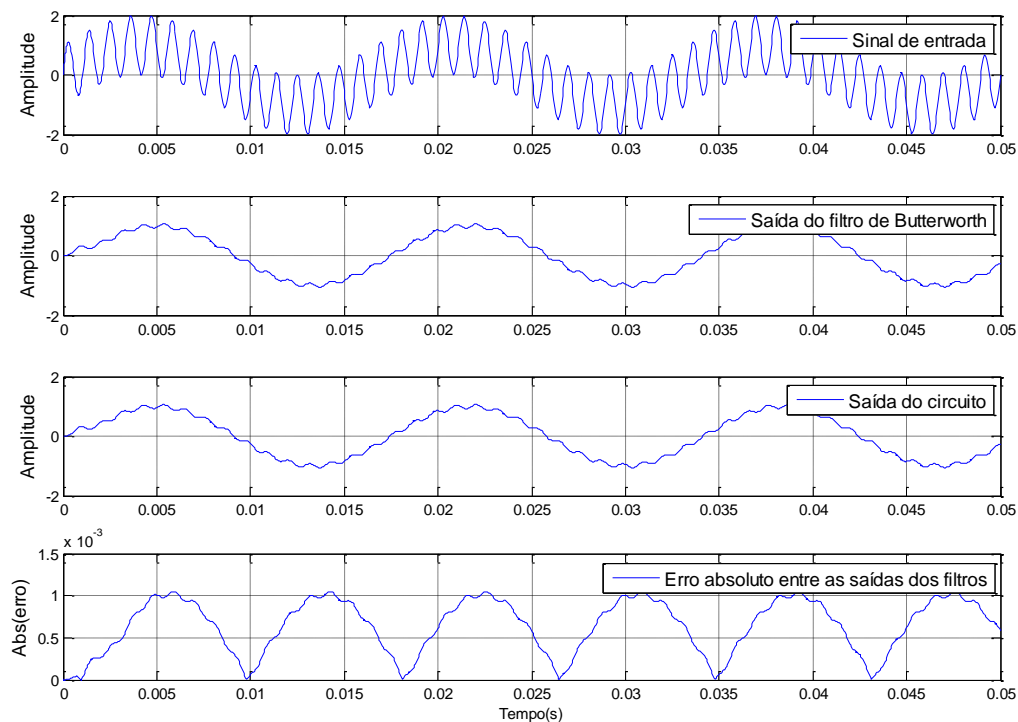


Figura 2.10 – Sinal de entrada com fundamental de 60 Hz e harmônica de 900 Hz, saída do filtro de Butterworth e saída do circuito

Como pode ser observado, pelos sinais mostrados na figura 2.10, o sinal de saída do circuito é muito próximo do sinal de saída resultante da função de transferência obtida pelo método de Butterworth.

2.2 FILTRAGEM DIGITAL DE SINAIS

Ao passar pelos estágios de filtragem analógica, os sinais de tensão e corrente são amostrados a uma taxa de pelo menos o dobro da maior harmônica contida no sinal. Neste trabalho, os sinais de tensão e corrente foram amostrados a uma taxa de 16 amostras por ciclo de 60 Hz ou 960 Hz.

A filtragem digital dos dados amostrados é um passo necessário na obtenção dos fasores de tensão e corrente, onde neste trabalho foi utilizado um filtro digital baseado no método dos mínimos quadrados (MMQ) em série com um filtro digital passa-baixas de Butterworth, cujos detalhes estão apresentados no item 2.2.1.

O processo de filtragem digital, como no processo de filtragem analógica, também é descrita pela seguinte equação (TERRELL, 1980):

$$Y(z) = T(z)X(z) \quad (2.19)$$

Onde:

$Y(z)$: transformada z saída do filtro digital;

$T(z)$: função de transferência do filtro;

$X(z)$: transformada z do sinal de entrada(sinal amostrado).

A função de transferência $T(z)$ é descrita da seguinte forma:

$$T(z) = \frac{a_1 + a_2z^{-1} + \dots + a_nz^{-n}}{b_1 + b_2z^{-1} + \dots + a_mz^{-m}} \quad (2.20)$$

O sinal de entrada $X(z)$, possui a seguinte forma:

$$X(z) = x_kz^0 + x_{k-1}z^{-1} + \dots + x_0z^{-k} \quad (2.21)$$

A variável z é definida da seguinte forma:

$$z = e^{sT} \quad (2.22)$$

Onde T é o período de amostragem.

A saída do filtro $Y(z)$, possui a seguinte forma:

$$Y(z) = y_k + y_{k-1}z^{-1} + \dots + y_0z^{-k} \quad (2.22)$$

Resolvendo a eq.(2.19), utilizando a eq.(2.20), eq.(2.21) e eq.(2.22), obtêm-se a seguinte equação para a saída do filtro digital:

$$y_k = a_1x_k + a_2x_{k-1} + \dots + a_nx_{k-n} - b_2y_{k-1} - b_3y_{k-2} - \dots - b_my_{k-m} \quad (2.23)$$

Com base na eq.(2.23), nota-se que se a função de transferência do filtro tiver os parâmetros b_2, b_3, \dots, b_m diferentes de zero, o filtro terá uma característica recursiva, ou seja, utilizará os dados de saída anteriores para calcular a nova saída.

Como nos filtros analógicos, também é possível obter a resposta em frequência do filtro digital, substituindo a variável z por $e^{\frac{j2\pi f}{f_s}}$, onde f_s é a frequência de amostragem, e calculando o módulo da função de transferência do filtro digital.

2.2.1 Filtro baseado no método dos mínimos quadrados (MMQ)

Na ocorrência de uma falta, os sinais de tensão e corrente apresentam uma componente contínua, mais especificamente uma componente exponencial, no período transitório.

A componente contínua, presente nos sinais de tensão e corrente durante o período transitório, ao passar pelo processo de obtenção da fundamental de sinais, pode causar erro no valor da fundamental.

Para evitar este erro, neste trabalho foi utilizado um filtro baseado no método dos mínimos quadrados (MUHAMMAD; ROY, 1997), onde o método dos mínimos quadrados consiste em representar um sinal através de funções pré-definidas.

Para representar os sinais de tensão e corrente a seguinte equação é utilizada:

$$f(t) = Ce^{-\alpha t} + c_1 \cos \omega t + c_2 \sin \omega t + \dots + c_{2n-1} \cos n\omega t + c_{2n} \sin n\omega t \quad (2.24)$$

Onde:

C : Constante multiplicativa da função exponencial;

α : Constante de decaimento da função exponencial;

c_{2n-1} : Constante multiplicativa da função cosseno;

c_{2n} : Constante multiplicativa da função seno.

Uma vez que o método dos mínimos quadrados consegue determinar somente coeficientes que multiplicam uma função, a função exponencial terá que ser expandida em série de Taylor, pois o valor do coeficiente α não é conhecido. Expandindo a função exponencial tem-se:

$$e^x = 1 + \frac{x}{1!} + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + \dots, \quad -\infty < x < \infty \quad (2.25)$$

Considerando somente os dois primeiros termos da série apresentada pela eq.(2.25), ou seja, aproximando a função exponencial por uma reta, tem-se:

$$Ce^{-\alpha t} = a + bt \quad (2.26)$$

Foram considerados somente os dois primeiros termos da série, pois com o aumento do número de termos, além de ser desnecessário, como apresentado em (PEREIRA, 1999), é causada uma diminuição no número de harmônicas que a função aproximadora é capaz de representar ao manter a janela de dados fixa.

Então, a função aproximadora apresentada pela eq.(2.24) toma a seguinte forma:

$$f(t) = c_1 \cos \omega t + c_2 \text{sen} \omega t + \dots + c_{2n-1} \cos n\omega t + c_{2n} \text{sen} n\omega t + c_{2n+1} + c_{2n+2}t \quad (2.27)$$

O número de coeficientes da função aproximadora, e, desta forma, o número de harmônicas, será limitado por uma janela de dados de N amostras por ciclo de 60 Hz, uma vez que o número de dados da janela deverá ser maior ou igual ao número de coeficientes que se deseja calcular.

Com base na limitação apresentada anteriormente, a variável n terá a seguinte relação com o número de amostras de uma janela de dados, N :

$$n = \frac{N}{2} - 1 \quad (2.28)$$

O método dos mínimos quadrados possui a seguinte forma para a estimativa linear de funções:

$$\begin{pmatrix} \sum_{i=0}^{\infty} f_1(t_{k-i})^2 & \sum_{i=0}^{\infty} f_1(t_{k-i})f_2(t_{k-i}) & \cdots & \sum_{i=0}^{\infty} f_1(t_{k-i})f_N(t_{k-i}) \\ \sum_{i=0}^{\infty} f_2(t_{k-i})f_1(t_{k-i}) & \sum_{i=0}^{\infty} f_2(t_{k-i})^2 & \cdots & \sum_{i=0}^{\infty} f_2(t_{k-i})f_N(t_{k-i}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{i=0}^{\infty} f_N(t_{k-i})f_1(t_{k-i}) & \sum_{i=0}^{\infty} f_N(t_{k-i})f_2(t_{k-i}) & \cdots & \sum_{i=0}^{\infty} f_N(t_{k-i})^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{i=0}^{\infty} f_1(t_{k-i})y_{k-i} \\ \sum_{i=0}^{\infty} f_2(t_{k-i})y_{k-i} \\ \vdots \\ \sum_{i=0}^{\infty} f_N(t_{k-i})y_{k-i} \end{pmatrix} \quad (2.29)$$

Para exemplificar o método e mostrar como a eq.(2.29) foi obtida, suponha inicialmente que uma amostra de dados deva ser estimada por uma reta, então a função aproximadora terá a seguinte forma:

$$y = ax + b \quad (2.30)$$

Onde: y e x são vetores contendo os dados das amostras e a e b são os coeficientes a determinar.

Definindo:

$$f_1(t_{k-i}) = x_{k-i}, \quad i = 0,1,2,\dots \quad (2.31)$$

$$f_2(t_{k-i}) = 1, \quad i = 0,1,2,\dots \quad (2.32)$$

Substituindo as equações (2.31) e (2.32) na eq.(2.30) e escrevendo na forma matricial, tem-se:

$$\begin{pmatrix} f_1(t_k) & f_2(t_k) \\ f_1(t_{k-1}) & f_2(t_{k-1}) \\ \vdots & \vdots \\ f_1(t_{k-i}) & f_2(t_{k-i}) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_k \\ y_{k-1} \\ \vdots \\ y_{k-i} \end{pmatrix} \quad (2.33)$$

Multiplicando ambos os lados da eq.(2.33) pela transposta do termo a esquerda da mesma equação, ou seja,

$$\begin{pmatrix} f_1(t_k) & f_1(t_{k-1}) & \cdots & f_1(t_{k-i}) \\ f_2(t_k) & f_2(t_{k-1}) & \cdots & f_2(t_{k-i}) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f_1(t_k) & f_2(t_k) \\ f_1(t_{k-1}) & f_2(t_{k-1}) \\ \vdots & \vdots \\ f_1(t_{k-i}) & f_2(t_{k-i}) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_k \\ y_{k-1} \\ \vdots \\ y_{k-i} \end{pmatrix} \quad (2.34)$$

e resolvendo, tem-se:

$$\begin{pmatrix} \sum_{i=0}^{\infty} f_1(t_{k-i})^2 & \sum_{i=0}^{\infty} f_1(t_{k-i})f_2(t_{k-i}) \\ \sum_{i=0}^{\infty} f_2(t_{k-i})f_1(t_{k-i}) & \sum_{i=0}^{\infty} f_2(t_{k-i})^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{i=0}^{\infty} f_1(t_{k-i})y_{k-i} \\ \sum_{i=0}^{\infty} f_2(t_{k-i})y_{k-i} \end{pmatrix} \quad (2.35)$$

Observa-se que a eq.(2.35) tem a mesma forma da eq.(2.29), estando então, de acordo com o método dos mínimos quadrados para estimativa de funções.

Para calcular os coeficientes a e b , basta multiplicar ambos os lados da eq.(2.35) pelo inverso do termo à esquerda, resultando em:

$$\begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{i=0}^{\infty} f_1(t_{k-i})^2 & \sum_{i=0}^{\infty} f_1(t_{k-i})f_2(t_{k-i}) \\ \sum_{i=0}^{\infty} f_2(t_{k-i})f_1(t_{k-i}) & \sum_{i=0}^{\infty} f_2(t_{k-i})^2 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \sum_{i=0}^{\infty} f_1(t_{k-i})y_{k-i} \\ \sum_{i=0}^{\infty} f_2(t_{k-i})y_{k-i} \end{pmatrix} \quad (2.36)$$

Substituindo na eq.(2.36) as relações definidas pela eq.(2.31) e eq.(2.32), tem-se:

$$\begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{i=0}^{\infty} x_{k-i}^2 & \sum_{i=0}^{\infty} x_{k-i} \\ \sum_{i=0}^{\infty} x_{k-i} & \sum_{i=0}^{\infty} 1 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \sum_{i=0}^{\infty} x_{k-i}y_{k-i} \\ \sum_{i=0}^{\infty} y_{k-i} \end{pmatrix} \quad (2.37)$$

Para a definição do filtro digital baseado no método dos mínimos quadrados, são utilizados os conceitos discutidos no exemplo, onde a função a ser aproximada será a definida na eq.(2.24).

Substituindo a variável n da eq.(2.24) pela relação definida pela eq.(2.28), tem-se:

$$f(t) = c_1 \cos \omega t + c_2 \sen \omega t + \dots + c_{N-3} \cos \left(\frac{N}{2} - 1 \right) \omega t + c_{N-2} \sen \left(\frac{N}{2} - 1 \right) \omega t + c_{N-1} + c_N t \quad (2.38)$$

Definindo:

$$f_1(t_{k-i}) = \cos \omega t_{k-i}, f_2(t_{k-i}) = \sen \omega t_{k-i}, \dots, f_{N-1}(t_{k-i}) = 1, f_N(t_{k-i}) = t_{k-i} \quad (2.39)$$

onde $i = 0, 1, 2, \dots, N-1$.

Substituindo as definições (2.39) na eq.(2.38) e colocando na forma matricial, tem-se:

$$\begin{pmatrix} f_1(t_k) & f_2(t_k) & \dots & f_N(t_k) \\ f_1(t_{k-1}) & f_2(t_{k-1}) & \dots & f_N(t_{k-1}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_1(t_{k-N+1}) & f_2(t_{k-N+1}) & \dots & f_N(t_{k-N+1}) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \vdots \\ c_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f(t_k) \\ f(t_{k-1}) \\ \vdots \\ f(t_{k-N+1}) \end{pmatrix} \quad (2.40)$$

Escrevendo a eq.(2.40) na forma:

$$FC = D \quad (2.41)$$

onde:

$$F = \begin{pmatrix} f_1(t_k) & f_2(t_k) & \dots & f_N(t_k) \\ f_1(t_{k-1}) & f_2(t_{k-1}) & \dots & f_N(t_{k-1}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_1(t_{k-N+1}) & f_2(t_{k-N+1}) & \dots & f_N(t_{k-N+1}) \end{pmatrix} \quad (2.42)$$

$$C = \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \vdots \\ c_N \end{pmatrix} \quad (2.43)$$

$$D = \begin{pmatrix} f(t_k) \\ f(t_{k-1}) \\ \vdots \\ f(t_{k-N+1}) \end{pmatrix} \quad (2.44)$$

e multiplicando ambos os lados da eq.(2.41), pela transposta da matriz F , tem-se:

$$F^T F C = F^T D \quad (2.45)$$

Isolando C na eq.(2.45), através da multiplicação de ambos os lados da mesma por $(F^T F)^{-1}$, resulta em:

$$C = (F^T F)^{-1} F^T D \quad (2.46)$$

Comparando a eq.(2.46) com a equação do filtro digital (2.19), a qual está reescrita na eq.(2.47) para melhor visualização, nota-se que o termo que multiplica D na eq.(2.46) é a função de transferência do filtro baseado no método dos mínimos quadrados.

$$Y(z) = T(z)X(z) \quad (2.47)$$

Escrevendo a eq.(2.46) na forma:

$$C = G D \quad (2.48)$$

onde:

$$G = (F^T F)^{-1} F^T = \begin{pmatrix} g_{11} & g_{12} & \cdots & g_{1N} \\ g_{21} & g_{22} & \cdots & g_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{N1} & g_{N2} & \cdots & g_{NN} \end{pmatrix} \quad (2.49)$$

Como neste trabalho o interesse é extrair a componente fundamental dos sinais de tensão e corrente, somente serão utilizados os coeficientes c_1 e c_2 . Então, as seguintes equações podem ser escritas com base na eq.(2.46):

$$c_1 = g_{11}f(t_k) + g_{12}f(t_{k-1}) + \dots + g_{1N}f(t_{k-N+1}) \quad (2.50)$$

$$c_2 = g_{21}f(t_k) + g_{22}f(t_{k-1}) + \dots + g_{2N}f(t_{k-N+1}) \quad (2.51)$$

Comparando a eq.(2.50) e eq.(2.51) com a eq.(2.23), a qual está reescrita na eq.(2.52) para melhor visualização, nota-se que a eq.(2.50) e eq.(2.51) descrevem um processo de filtragem com os parâmetros b_2, b_3, \dots, b_m iguais a zero, ou seja, com o denominador igual a um.

$$y_k = a_1 x_k + a_2 x_{k-1} + \dots + a_n x_{k-n} - b_2 y_{k-1} - b_3 y_{k-2} - \dots - b_m y_{k-m} \quad (2.52)$$

Como o coeficiente c_1 multiplica $\cos \omega t$ na eq.(2.38), define-se a eq.(2.53) como sendo um filtro cosseno, analogamente, como o coeficiente c_2 multiplica $\sin \omega t$ na eq.(2.38), define-se a eq.(2.54) como sendo um filtro seno.

$$Y_c(z) = g_{11} + g_{12}z^{-1} + \dots + g_{1N}z^{-N+1} \quad (2.53)$$

$$Y_s(z) = g_{21} + g_{22}z^{-1} + \dots + g_{2N}z^{-N+1} \quad (2.54)$$

Para um dado instante k , o módulo e a fase da componente fundamental do sinal amostrado são calculados da seguinte forma:

$$M_k = \sqrt{c_1^2 + c_2^2} \quad (2.55)$$

$$\Phi_k = \tan^{-1} \frac{c_2}{c_1} \quad (2.56)$$

Um inconveniente do filtro digital baseado no método dos mínimos quadrados, é que ele apresenta um alto ganho para harmônicas que possuem a metade da frequência de amostragem. As figuras 2.11 e 2.12 mostram a resposta em frequência do filtro MMQ para $N=8$ e $N=16$, respectivamente, onde o efeito do ganho na metade da frequência de amostragem pode ser notado:

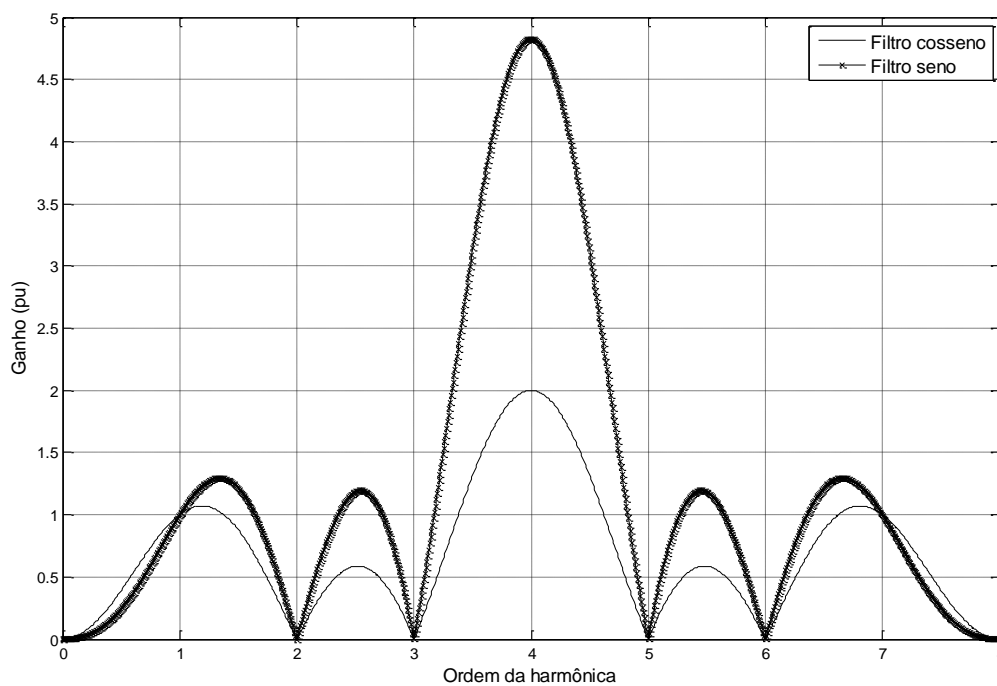


Figura 2.11 – Resposta em frequência do filtro MMQ para $N = 8$

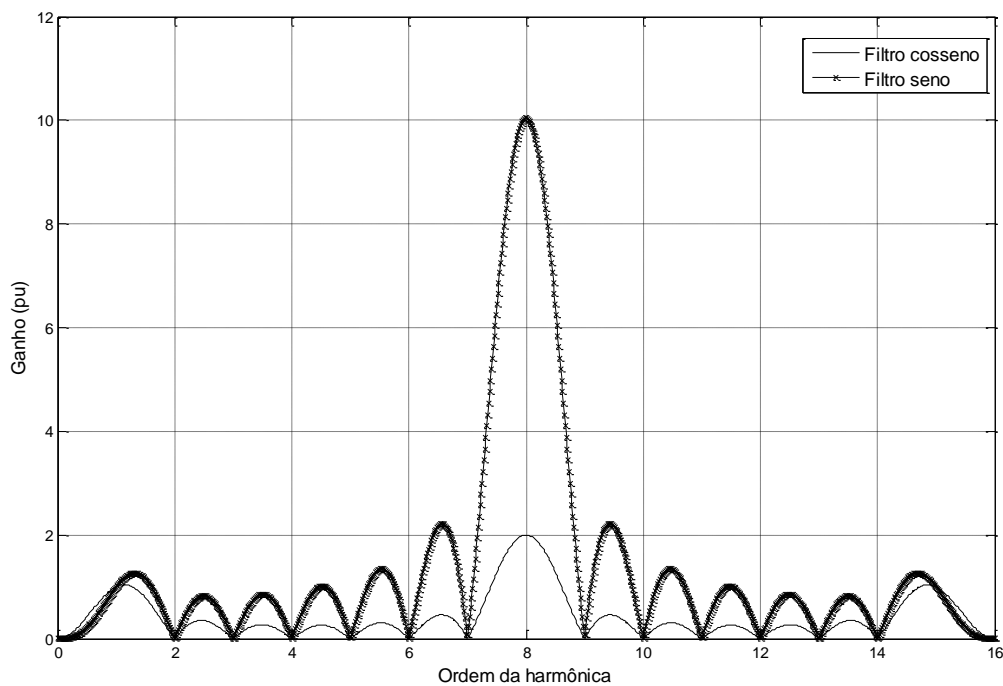


Figura 2.12 – Resposta em frequência do filtro MMQ para $N = 16$

Como pode ser notado, também, nas figuras 2.11 e 2.12, o ganho dos filtros cosseno e seno são unitários na frequência da componente fundamental e zero para as outras componentes, exceto para o caso previamente discutido.

Para resolver o problema causado por um alto ganho na metade da frequência de amostragem, foi utilizado um filtro digital de Butterworth de 3ª ordem com frequência de corte de 180 Hz em série com o filtro MMQ. A figura 2.13 mostra a resposta em frequência da associação em série do filtro digital de Butterworth com o filtro MMQ:

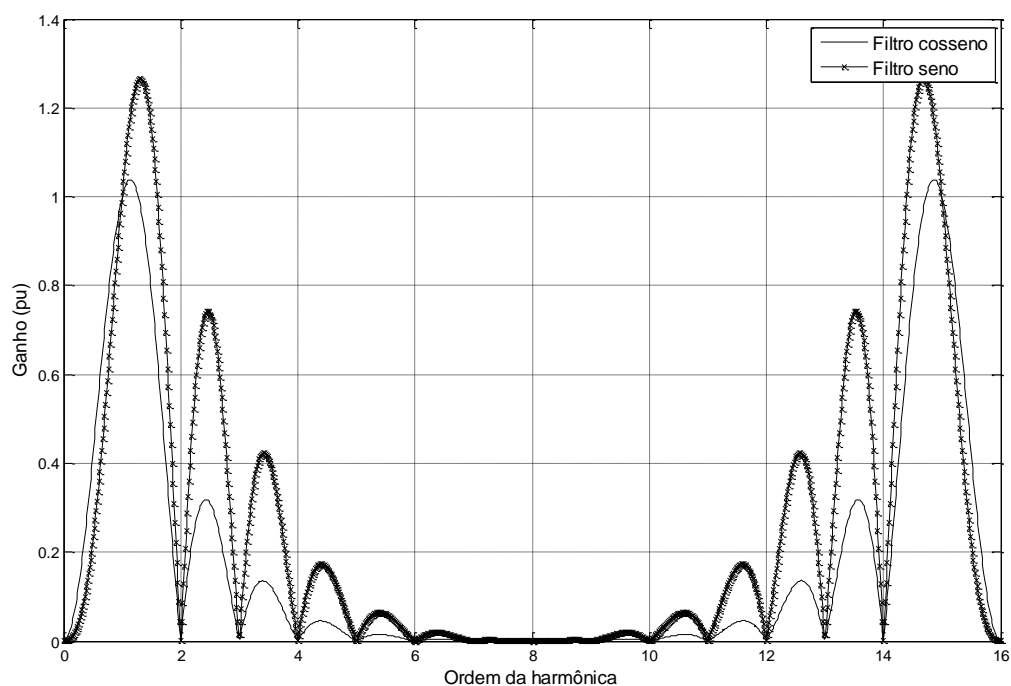


Figura 2.13 – Resposta em frequência da associação em série do filtro de Butterworth com o filtro MMQ

2.3 OBTENÇÃO DOS FASORES DE TENSÃO E CORRENTE

Após a etapa de filtragem digital, onde foram obtidos o módulo e a fase dos sinais, é necessário extrair o módulo e a fase dos sinais de tensão e corrente pré-falta e pós-falta, uma vez que os módulos e as fases obtidos através dos filtros compreendem desde o regime permanente sem falta, passando pelo regime transitório e terminando no regime permanente com falta, como mostra a figura 2.14:

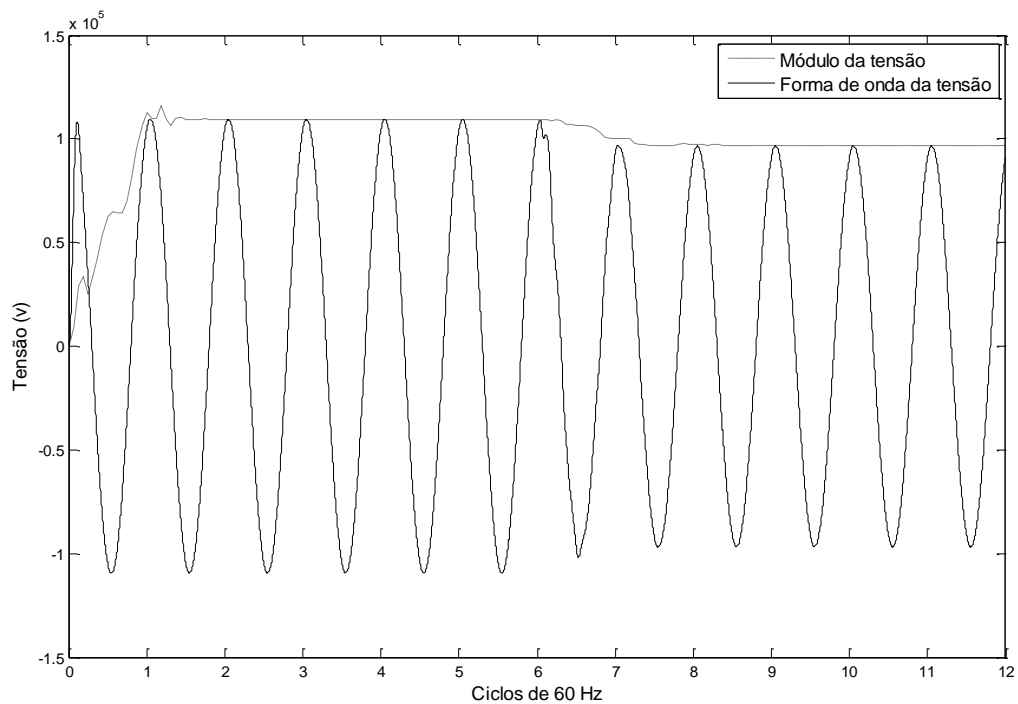


Figura 2.14 – Forma de onda da tensão e módulo calculado pelo filtro MMQ

Para obter o módulo e a fase dos sinais de tensão e corrente no período pré-falta e durante a falta, é necessário conhecer o instante de ocorrência da falta. Neste trabalho o instante de ocorrência da falta foi obtido através do método utilizado pelos relés de distância (CHO; JUNG; KIM, 2005), onde ao detectarem um valor de impedância, cujos cálculos dependem do tipo de falta ocorrido, abaixo de certo nível, determinam o instante de ocorrência da falta.

Obtido o instante de falta, os dados correspondentes ao módulo dos sinais de tensão e corrente são, então, separados em duas partes, uma parte correspondendo ao período pré-falta e a outra parte correspondendo ao período com falta. Estando separadas as partes, é realizada a média aritmética de cada uma para não correr o risco de utilizar um dado mal condicionado, e, então, os resultados obtidos são os módulos dos sinais de tensão e corrente pré-falta e durante a falta.

Para obter a fase dos sinais de tensão e corrente é necessário utilizar um sinal de referência, pois ao deslocar a janela de dados ocorre um deslocamento da fase, como mostra a figura 2.15:

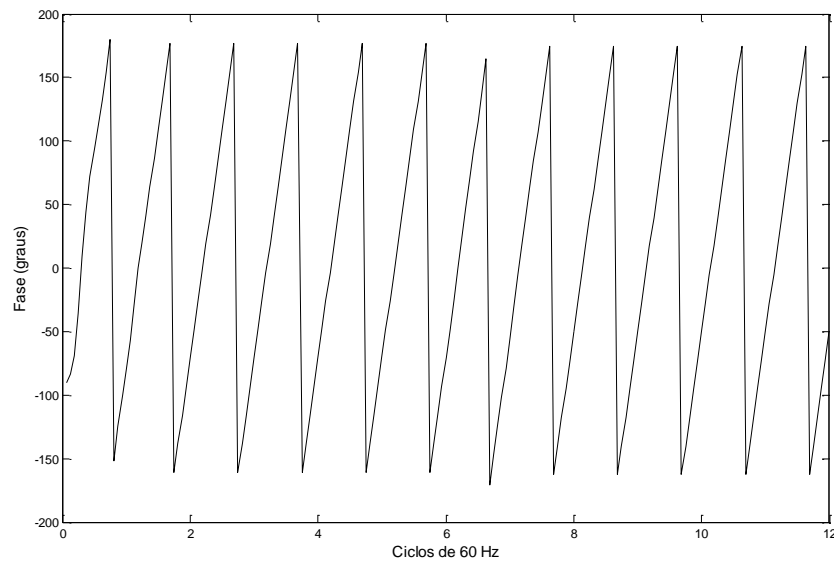


Figura 2.15 – Fase da tensão da figura 2.14 calculada pelo filtro MMQ

O sinal de referência possui amplitude unitária e ângulo zero, ele é, então, amostrado junto com os sinais de tensão e corrente, sofrendo assim os mesmos defasamentos que os sinais de tensão e corrente ao passar pelos filtros analógico e digital, pois do contrário a correção da fase dos sinais de tensão e corrente pelo sinal de referência resultaria em erro. A figura 2.16 mostra a fase do sinal de referência juntamente com a fase mostrada na figura 2.15:

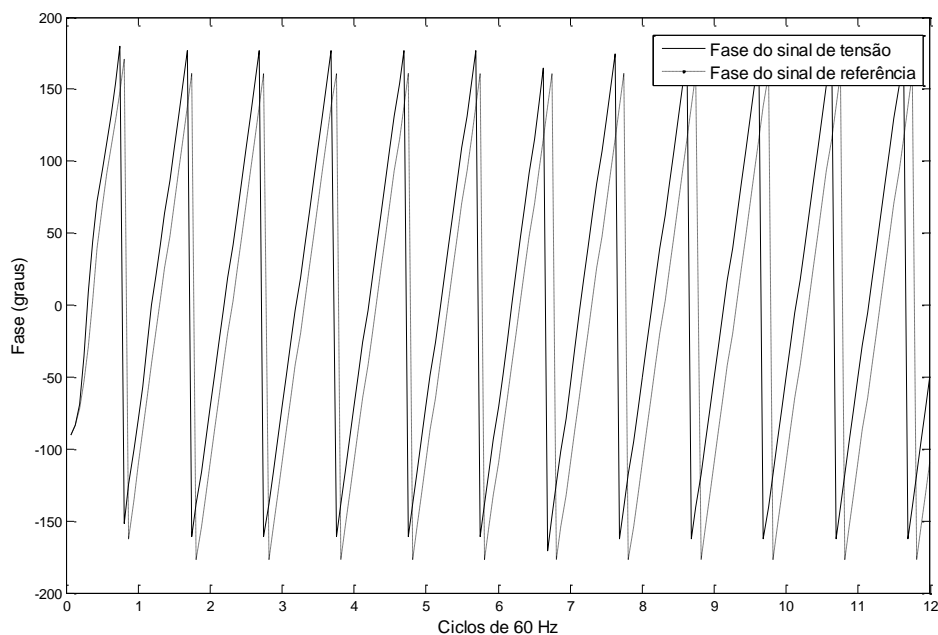


Figura 2.16 – Fase do sinal de tensão e do sinal de referência

Ao realizar a correção da fase com o sinal de referência, como mostra a figura 2.17, o mesmo procedimento para obter o módulo dos sinais de tensões e correntes pré-falta e durante a falta é aplicado, ou seja, através do instante de falta os dados de fase são divididos em duas partes, uma contendo os dados de fase pré-falta e a outra contendo os dados de fase durante a falta. Estando separadas as partes, é realizada a média aritmética de cada uma para não correr o risco de utilizar um dado mal condicionado, e, então, os resultados obtidos serão as fases dos sinais de tensão e corrente pré-falta e durante a falta.

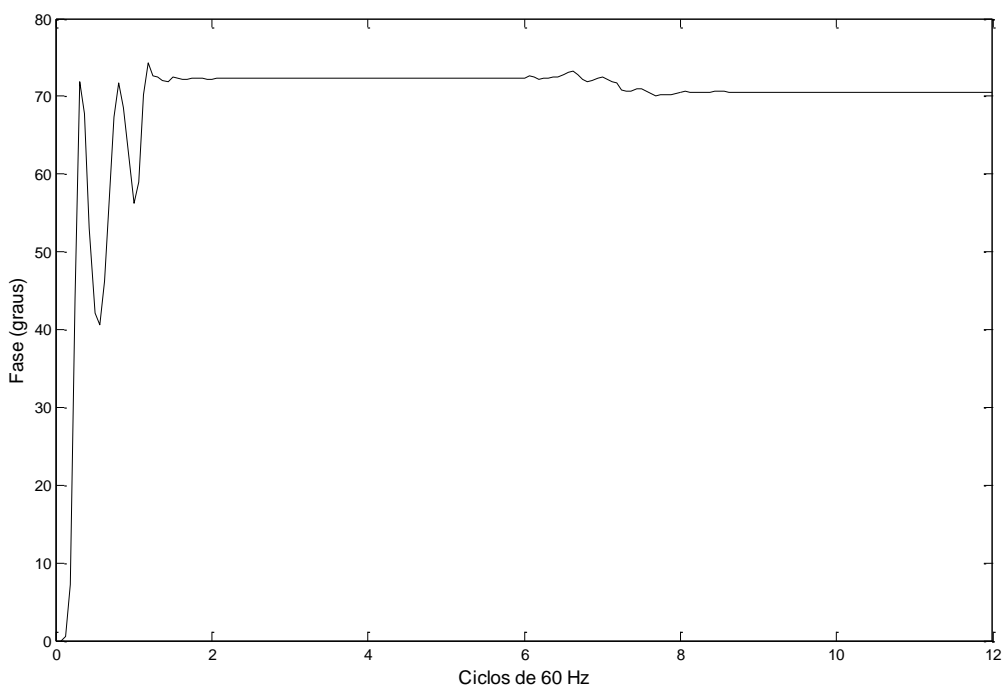


Figura 2.17 – Fase do sinal de tensão da figura 2.14

Antes, ainda, de obter a fase mostrada pela figura 2.17, os valores de fase, resultantes do ajuste pelo sinal de referência, devem ser ajustados de forma que os ângulos fiquem no intervalo $[-180^{\circ}, 180^{\circ}]$, obtendo, desta forma, um valor contínuo para a fase, como mostra a figura 2.17.

3 MÉTODO DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS PROPOSTO

O método proposto neste trabalho foi desenvolvido com a finalidade de determinar o local de ocorrência da falta bem como o tipo de falta ocorrido, a distância de ocorrência da falta com relação a uma referência adotada e a resistência de falta, em linhas de transmissão com derivações, como mostra a figura 3.1:

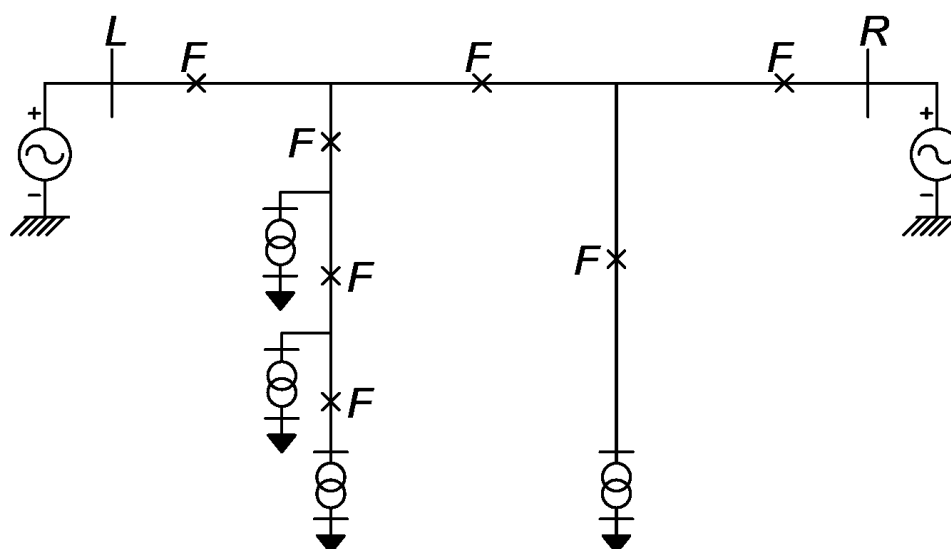


Figura 3.1 – Linha de transmissão com derivações, onde L representa o terminal L , R representa o terminal R e F representa as faltas

No método são utilizados os fasores de tensão e corrente pré-falta e pós-falta medidos em dois terminais da linha de transmissão, ou seja, nos terminais L e R como mostra a figura 3.1, não sendo necessárias medições dos sinais de tensão e corrente nos terminais das cargas, uma vez que nem sempre tais medições estão disponíveis.

Uma vez que o método não necessita de medições de tensão e corrente realizadas nos terminais das cargas faz-se necessária a estimativa das cargas. Para realizar tais estimativas foi desenvolvido um algoritmo que está apresentado em detalhes no item 3.1.

O método proposto de localização de faltas é descrito de forma geral no diagrama de blocos apresentado na figura 3.2:

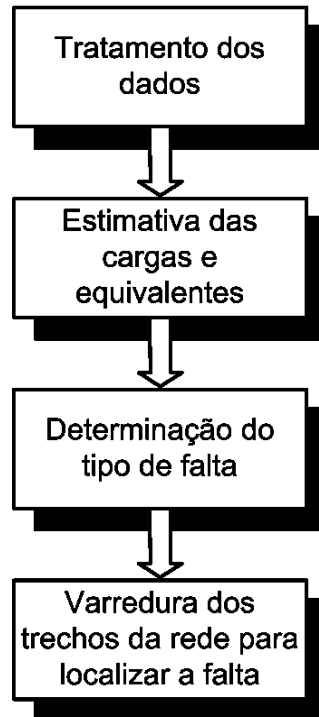


Figura 3.2 – Passos do método de localização de faltas

Cada bloco do diagrama apresentado pela figura 3.2 tem a seguinte funcionalidade:

- ❖ **Tratamento dos dados:** Nesta etapa ocorrem a filtragem digital dos dados amostrados, utilizando o filtro MMQ em série com um filtro passa-baixas de Butterworth, e a determinação do instante de falta, a fim de se obter os fasores de tensão e corrente medidos nos terminais local e remoto da linha de transmissão. Tal etapa está descrita no capítulo 2.
- ❖ **Estimativa das cargas e dos equivalentes:** Nesta etapa são estimadas as cargas conectadas à rede, uma vez que o método utiliza somente dados medidos nos terminais local e remoto. Nesta etapa são estimadas, também, as impedâncias equivalentes dos geradores bem como suas tensões internas. Tais procedimentos estão descritos no item 3.1.
- ❖ **Determinação do tipo de falta:** Nesta etapa é feita a determinação do tipo de falta ocorrido, necessário ao algoritmo de localização de faltas. Esta etapa está descrita no item 3.2.

- ❖ **Varredura dos trechos da rede para localizar a falta:** O algoritmo de localização de faltas faz uma varredura nos trechos da rede para identificar o local de ocorrência da falta, a distância da falta e a impedância de falta. O algoritmo está descrito em detalhes no item 3.3.

3.1 ALGORITMO DE ESTIMATIVA DAS CARGAS E EQUIVALENTES

O algoritmo de localização de faltas proposto utiliza somente dados de tensão e corrente medidos no terminal local e remoto. Por apresentar esta característica é necessário que seja feita a estimativa das cargas conectadas na rede. Faz-se necessário também estimar os valores das impedâncias equivalentes, bem como as tensões internas, dos geradores, uma vez que esses dados não são disponíveis.

Neste trabalho a linha é considerada continuamente transposta, as cargas são consideradas simétricas e com impedância constante e os geradores são considerados simétricos.

Para estimar a impedância das cargas foi desenvolvido um algoritmo, semelhante ao algoritmo apresentado em (MANASSERO, 2006), com a diferença de que o algoritmo desenvolvido neste trabalho utiliza a matriz de admitâncias da rede para calcular as tensões e correntes pré-falta nos terminais, local e remoto, e, então minimizar, variando as impedâncias das cargas na matriz de admitâncias, o erro entre as tensões e correntes calculadas e medidas nos terminais citados acima, já o algoritmo apresentado em (MANASSERO, 2006) realiza todo o cálculo de fluxo de potência a cada iteração, onde a impedância das cargas é corrigida, calculando, em cada iteração, ou seja, não somente na estimativa inicial, as perdas nos trechos da rede e a potência absorvida pelas cargas e transformadores, a fim de minimizar o erro entre a potência aparente medida e calculada.

O algoritmo de estimativa das cargas desenvolvido neste trabalho está dividido em duas etapas: a primeira etapa, descrita em detalhes no item 3.1.2, é a estimativa inicial da impedância das cargas a ser utilizada pela função objetivo, a segunda etapa, descrita em detalhes no item 3.1.3, é realizada por uma função objetivo, a

qual minimiza o erro entre as tensões e correntes pré-falta calculadas e medidas nos terminais local e remoto variando a impedância das cargas na matriz de admitâncias.

3.1.1 Procedimento para estimativa do equivalente e da tensão interna dos geradores

Para estimar a impedância equivalente e a tensão interna dos geradores, são utilizadas as tensões e correntes pré-falta e pós-falta medidas nos terminais local e remoto.

Para realizar tal estimativa são calculadas as componentes simétricas das referidas tensões e correntes, como segue:

Para as tensões e correntes pré-falta tem-se:

$$[V_{012}]_{pré}^L = T^{-1}[V_{abc}]_{pré}^L \quad (3.1)$$

$$[V_{012}]_{pré}^R = T^{-1}[V_{abc}]_{pré}^R \quad (3.2)$$

$$[I_{012}]_{pré}^L = T^{-1}[I_{abc}]_{pré}^L \quad (3.3)$$

$$[I_{012}]_{pré}^R = T^{-1}[I_{abc}]_{pré}^R \quad (3.4)$$

Para as tensões e correntes pós-falta tem-se:

$$[V_{012}]_{pós}^L = T^{-1}[V_{abc}]_{pós}^L \quad (3.5)$$

$$[V_{012}]_{pós}^R = T^{-1}[V_{abc}]_{pós}^R \quad (3.6)$$

$$[I_{012}]_{pós}^L = T^{-1}[I_{abc}]_{pós}^L \quad (3.7)$$

$$[I_{012}]_{pós}^R = T^{-1}[I_{abc}]_{pós}^R \quad (3.8)$$

Onde T é a matriz de transformação, dada por:

$$T = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{pmatrix}, \text{ onde } \alpha = 1 \angle 120^\circ \quad (3.9)$$

Então, para a impedância equivalente de sequência positiva do gerador do terminal local, tem-se:

$$Z_{1eq}^L = \left(\frac{V_{1pré}^L - V_{1pós}^L}{I_{1pós}^L - I_{1pré}^L} \right) \quad (3.10)$$

Para a sequência zero tem-se:

$$Z_{0eq}^L = \left(\frac{V_{0pré}^L - V_{0pós}^L}{I_{0pós}^L - I_{0pré}^L} \right) \quad (3.11)$$

A impedância equivalente de sequência negativa é considerada ser idêntica à impedância equivalente de sequência positiva.

A tensão interna de sequência positiva do gerador do terminal local, o qual é considerado tendo somente esta sequência, é calculada da seguinte forma:

$$E_1^L = Z_{1eq}^L I_{1pré}^L + V_{1pré}^L \quad (3.12)$$

Para a impedância equivalente de sequência positiva do gerador do terminal remoto, tem-se:

$$Z_{1eq}^R = \left(\frac{V_{1pré}^R - V_{1pós}^R}{I_{1pós}^R - I_{1pré}^R} \right) \quad (3.13)$$

Para a sequência zero tem-se:

$$Z_{0eq}^R = \left(\frac{V_{0pré}^R - V_{0pós}^R}{I_{0pós}^R - I_{0pré}^R} \right) \quad (3.14)$$

A impedância equivalente de sequência negativa é considerada ser idêntica à impedância equivalente de sequência positiva.

A tensão interna de sequência positiva do gerador do terminal remoto, o qual é considerado tendo somente esta sequência, é calculada da seguinte forma:

$$E_1^R = Z_{1eq}^R I_{1pré}^R + V_{1pré}^R \quad (3.15)$$

Nas equações (3.11) e (3.14) as componentes de sequência zero das tensões e correntes pré-falta são iguais a zero, pois a rede é considerada ser simétrica.

3.1.2 Procedimento para estimativa inicial das cargas

Para poder obter melhores resultados e convergir mais rapidamente, foi utilizada uma estimativa inicial das cargas na função objetivo. Tal estimativa inicial é obtida pelo procedimento mostrado pelo fluxograma da figura 3.3:

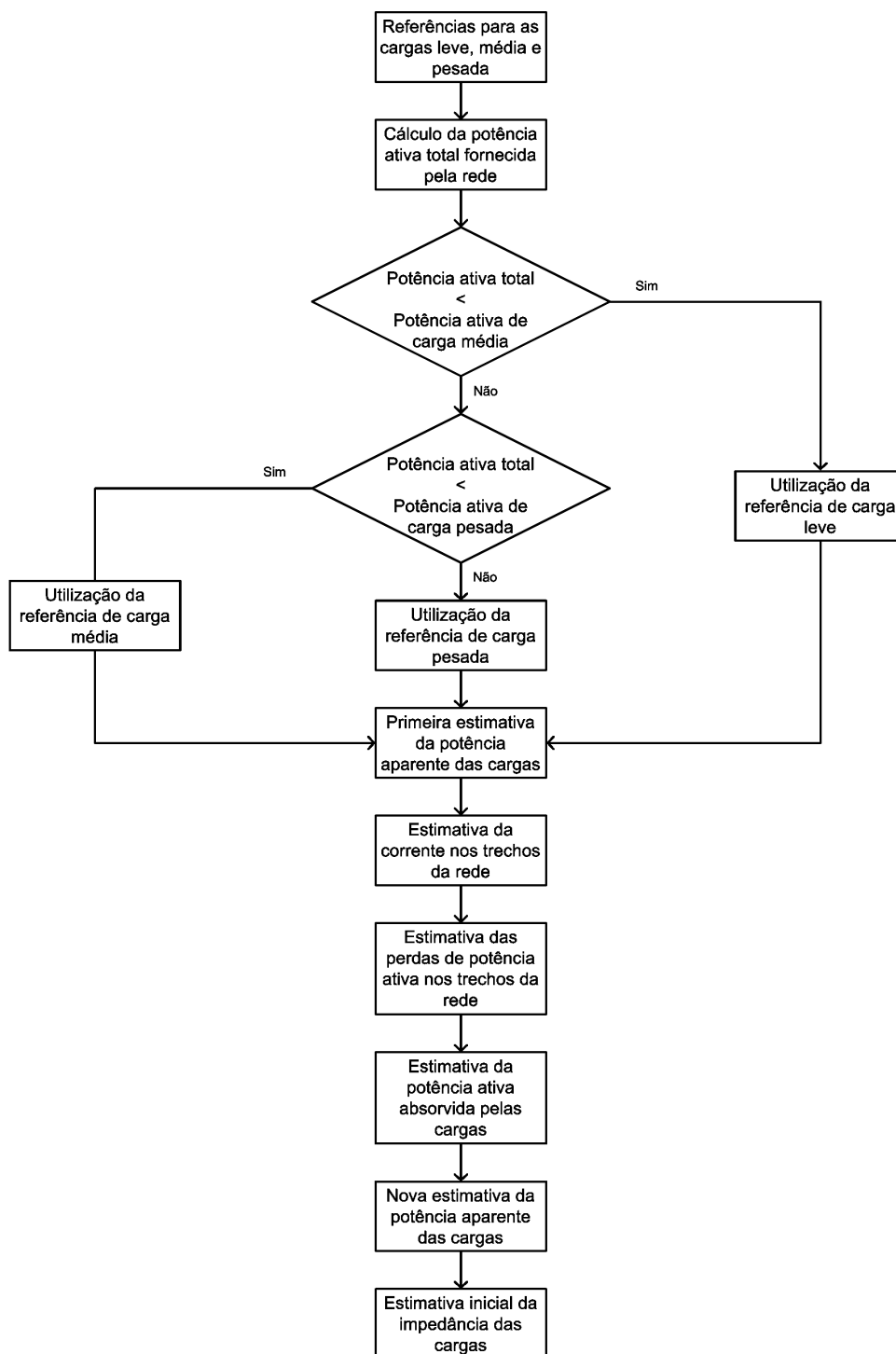


Figura 3.3 – Fluxograma da estimativa inicial da impedância das cargas

A referência para carga leve, média e pesada é adquirida a partir dos arquivos de cargas disponibilizados pelos programas de fluxo de potência.

A potência ativa total fornecida pela rede é obtida através dos fasores de tensão e corrente pré-falta, como segue:

$$P_{tot} = \text{Re} \left\{ \left(V_a^L \quad V_b^L \quad V_c^L \right)_{pré} \begin{pmatrix} I_a^L \\ I_b^L \\ I_c^L \end{pmatrix}_{pré}^* + \left(V_a^R \quad V_b^R \quad V_c^R \right)_{pré} \begin{pmatrix} I_a^R \\ I_b^R \\ I_c^R \end{pmatrix}_{pré}^* \right\} \quad (3.16)$$

Onde:

P_{tot} é a potência total fornecida pela linha;

$\text{Re}\{\cdot\}$ significa a parte real do número complexo;

L e R representam os terminais local e remoto da rede respectivamente.

Calculada a potência ativa total fornecida pela linha, é feita a comparação da referida potência com as potências ativas de carga leve, média e pesada.

Definida a referência a ser utilizada é feita uma primeira estimativa da potência aparente das cargas, como segue:

$$S_{carga}^j = \frac{S_r^j}{\sum_j P_r^j} P_{tot} \quad (3.17)$$

Onde:

S_r^j é a potência aparente de referência para a carga j ;

$\sum_j P_r^j$ é a somatória das potências ativas das referências das cargas.

Realizada as estimativas das potências aparentes das cargas é feita a estimativa das correntes nos trechos da rede, através das cargas estimadas e através da 1ª lei de Kirchhoff.

Estimadas as correntes nos trechos da rede, estimam-se as perdas ativas na rede e nos transformadores, segundo as seguintes equações:

$$P_{trecho}^u = 3Re\{Z_{trecho}^u\} |I_f^u|^2 \quad (3.18)$$

Onde:

Z_{trecho}^u é a impedância do trecho u ;

I_f^u é a corrente de fase do trecho u .

$$P_{trafo}^j = 3Re\{Z_{trafo}^j\} |I_f^j|^2 \quad (3.19)$$

Onde:

Z_{trafo}^j é a impedância do transformador ligado à carga j referida ao primário.

I_f^j é a corrente de fase que passa na impedância do transformador.

Nas equações acima é considerado que as cargas são simétricas.

Então as perdas totais são:

$$P_{perdas} = \sum_u P_{trecho}^u + \sum_j P_{trafo}^j \quad (3.20)$$

Subtraindo as perdas ativas da potência ativa total fornecida pela rede, obtêm-se uma estimativa da potência ativa total fornecida às cargas:

$$P_{totcargas} = P_{tot} - P_{perdas} \quad (3.21)$$

Então, estima-se novamente a potência aparente das cargas:

$$S_{carga}^j = \frac{S_r^j}{\sum_j P_r^j} P_{totcargas} \quad (3.22)$$

Estimadas as novas potências aparentes das cargas, calculam-se as impedâncias das cargas, obtendo uma estimativa inicial para ser usada na função objetivo descrita no item 3.1.2. O cálculo da impedância das cargas é feito pela seguinte equação:

$$Z_{carga}^j = \frac{|V_{nominal(linha)}|^2}{S_{carga}^{j*}} \quad (3.23)$$

3.1.3 Função objetivo para estimativa das cargas

Obtida a estimativa inicial das cargas no item 3.1.2, elas são utilizadas na função objetivo cujo procedimento é mostrado pelo fluxograma da figura 3.4, como segue:

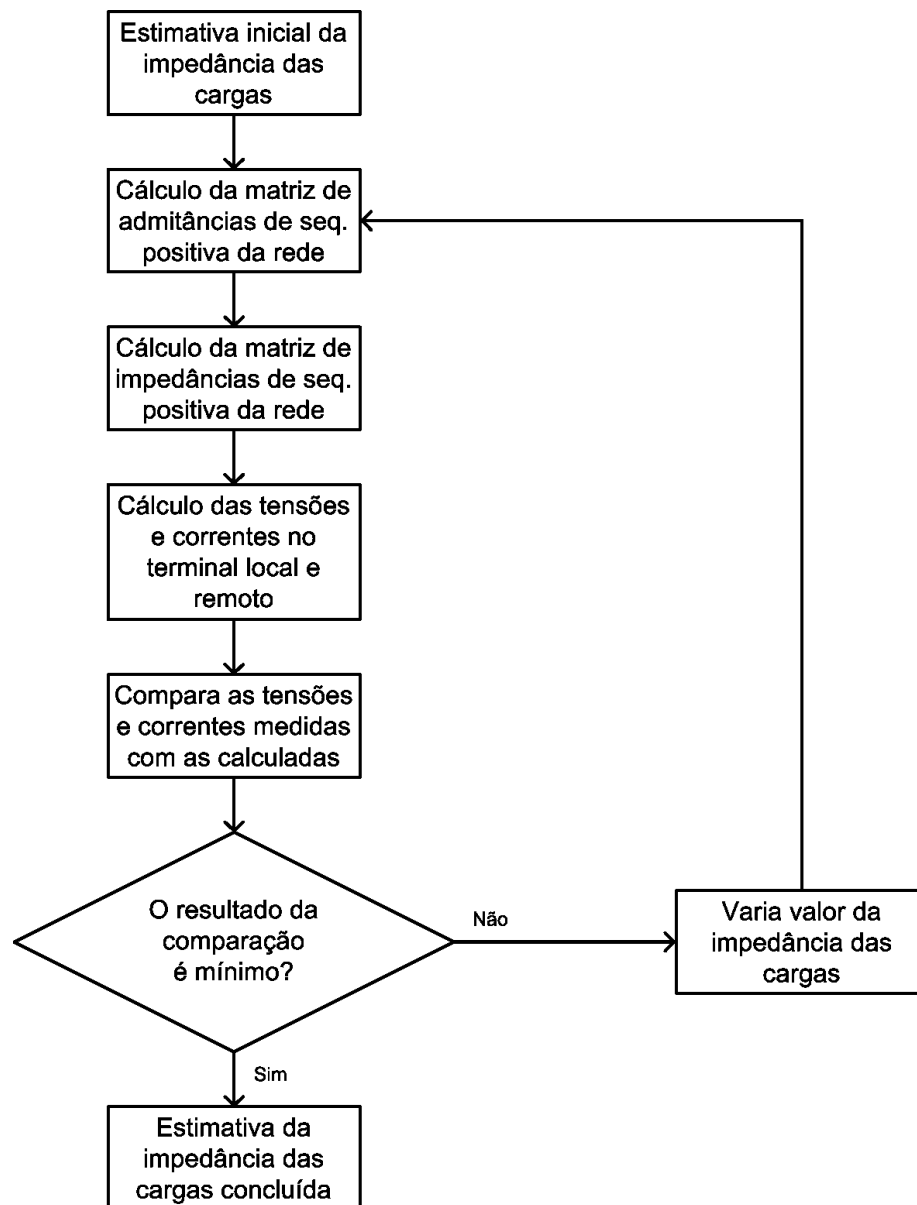


Figura 3.4 – Fluxograma da função objetivo de estimativa da impedância das cargas

Além da estimativa inicial da impedância das cargas, a função objetivo também utiliza como dados as tensões e correntes pré-falta, as impedâncias e admitâncias dos trechos da rede, os equivalentes e as tensões internas dos geradores e as impedâncias dos transformadores referidas ao primário.

O cálculo das tensões e correntes nos terminais local e remoto é feito da seguinte forma:

Montada a matriz $[Y_{barras}]$ de sequência positiva da rede, uma vez que neste trabalho a rede é considerada continuamente transposta e simétrica, é calculada a matriz $[Z_{barras}]$ da referida rede, invertendo-se a matriz $[Y_{barras}]$.

As tensões nos nós são, então, obtidas multiplicando a matriz $[Z_{barras}]$ pelas correntes de Norton (STEVENSON Jr., 1974), ou seja,

$$[V_{barras}] = \begin{pmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \cdots & Z_{1n} \\ Z_{21} & Z_{22} & \cdots & Z_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{n1} & Z_{n2} & \cdots & Z_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{N1} \\ I_{N2} \\ \vdots \\ I_{Nn} \end{pmatrix} \quad (3.24)$$

Portanto, através da eq.(3.24) são obtidas as tensões de sequência positiva dos terminais local e remoto.

As correntes nos terminais local e remoto são, então, calculadas da seguinte forma:

$$I_{1précalc}^L = \frac{(E_1^L - V_{1précalc}^L)}{Z_{1eq}^L} \quad (3.25)$$

Onde:

$I_{1précalc}^L$ é a corrente pré-falta de sequência positiva, calculada, no terminal local;

E_1^L é a tensão interna de sequência positiva do gerador do terminal local;

$V_{1précalc}^L$ é a tensão pré-falta de sequência positiva, calculada, no terminal local;

Z_{1eq}^L é a impedância equivalente de sequência positiva do gerador do terminal local.

$$I_{1précalc}^R = \frac{(E_1^R - V_{1précalc}^R)}{Z_{1eq}^R} \quad (3.26)$$

Onde:

$I_{1précalc}^R$ é a corrente pré-falta de sequência positiva, calculada, no terminal remoto;

E_1^R é a tensão interna de sequência positiva do gerador do terminal remoto;

$V_{1précalc}^R$ é a tensão pré-falta de sequência positiva, calculada, no terminal remoto;

Z_{1eq}^R é a impedância equivalente de sequência positiva do gerador do terminal remoto.

A função objetivo minimiza, então, a seguinte relação:

$$G = ErroV + ErroI \quad (3.27)$$

Onde:

$$ErroV = \left| \frac{(V_{1prémed}^L - V_{1précalc}^L)}{V_{1prémed}^L} \right| + \left| \frac{(V_{1prémed}^R - V_{1précalc}^R)}{V_{1prémed}^R} \right| \quad (3.28)$$

e

$$ErroI = \left| \frac{(I_{1prémed}^L - I_{1précalc}^L)}{I_{1prémed}^L} \right| + \left| \frac{(I_{1prémed}^R - I_{1précalc}^R)}{I_{1prémed}^R} \right| \quad (3.29)$$

Onde:

$V_{1prémed}^L$ é a tensão de sequência positiva pré-falta, medida, no terminal local;

$I_{1prémed}^L$ é a corrente de sequência positiva pré-falta, medida, no terminal local;

$V_{1prémed}^R$ é a tensão de sequência positiva pré-falta, medida, no terminal remoto;

$I_{1prémed}^R$ é a corrente de sequência positiva pré-falta, medida, no terminal remoto.

Após obter o mínimo valor da relação apresentada na eq.(3.27), a função objetivo retorna a estimativa da impedância das cargas.

3.2 DETERMINAÇÃO DO TIPO DE FALTA

O algoritmo de localização de faltas proposto necessita que o tipo de falta seja determinado, as quais podem ser faltas AN, BN, CN, AB, BC, CA, ABN, BCN, CAN e ABC.

Para determinar o tipo de falta ocorrido foi utilizado o método proposto em (PEREIRA, 1999) adaptado para o caso deste trabalho, onde foram utilizados, além das componentes de fase e sequenciais da corrente em um dos terminais, os fasores de tensão medidos em ambos os terminais, local e remoto. Foi incluído também, um parâmetro adicional para comparar as tensões de fase, uma vez que o método proposto em (PEREIRA, 1999) utiliza somente parâmetros para comparar as correntes de fase e sequenciais medidas em um dos terminais.

Os parâmetros foram determinados para o pior caso, que é uma falta em uma derivação longa no ponto médio entre os dois terminais. Os parâmetros obtidos para essa situação foram os seguintes:

- $\varepsilon = 0,25$;
- $\varepsilon_0 = 0,05$;
- $\delta = 0,65$;
- $\tau = 0,97$.

Onde os parâmetros ε , δ e τ são utilizados para verificação das componentes de sequência positiva das correntes de um dos terminais, para verificação das componentes de fase das correntes de um dos terminais e para a verificação das componentes de fase das tensões de ambos os terminais, respectivamente. O parâmetro ε_0 , utilizado para a verificação das componentes de sequência zero das correntes, foi utilizado somente para evitar possíveis erros numéricos.

O fluxograma que descreve o procedimento de determinação do tipo de falta está apresentado na figura 3.5.

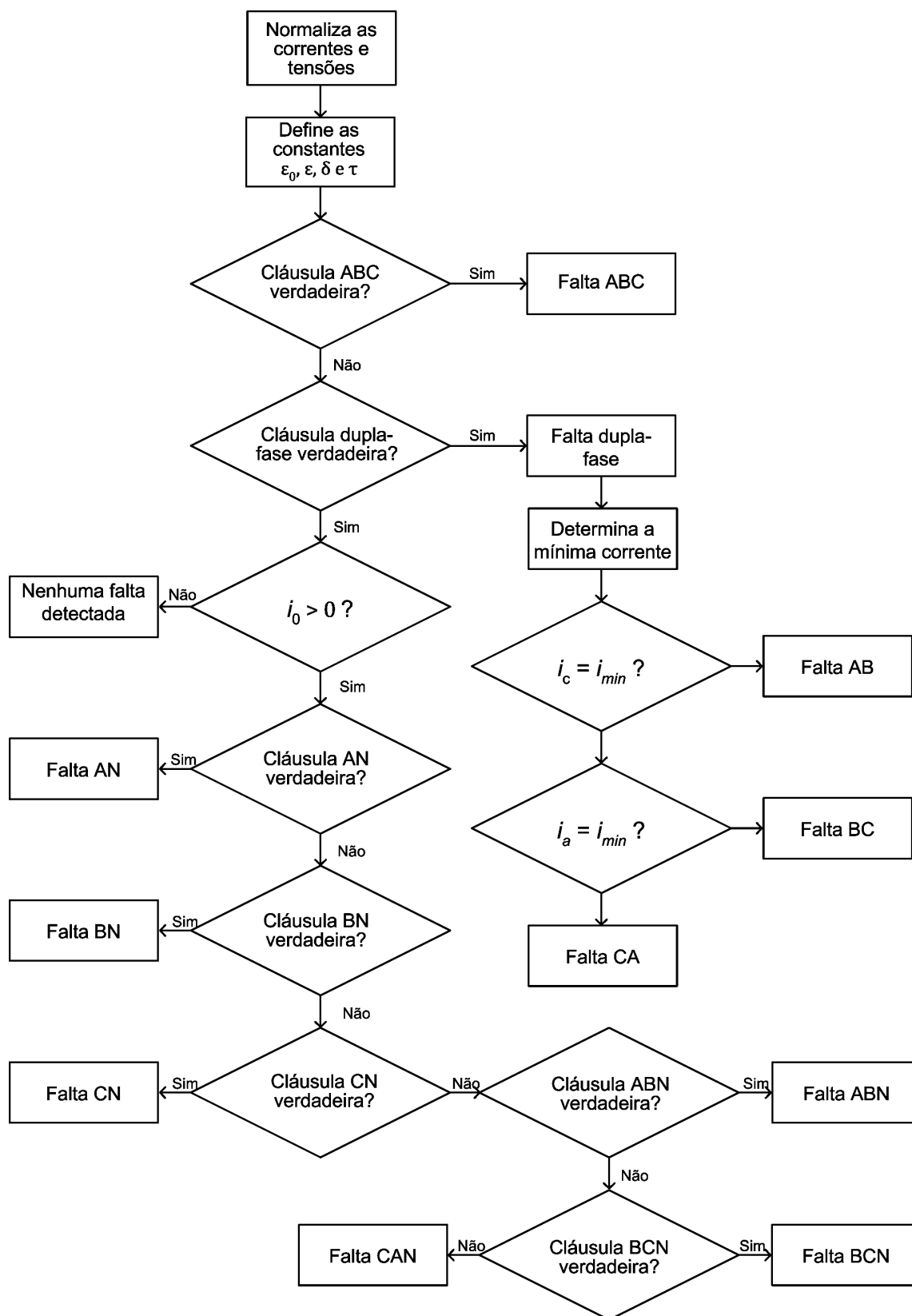


Figura 3.5 – Fluxograma do método de determinação do tipo de falta

Na figura 3.5:

- **Cláusula ABC:** $i_0 < \varepsilon_0$ e $i_1 > (1-\varepsilon)$ e $i_2 < \varepsilon_0$
- **Cláusula dupla-fase:** $i_0 < \varepsilon_0$ e $i_1 > (1-\varepsilon)$ e $i_2 > (1-\varepsilon)$
- **Cláusula AN:** $(V_a^L < \tau$ e $V_b^L > \tau$ e $V_c^L > \tau)$ e $(V_a^R < \tau$ e $V_b^R > \tau$ e $V_c^R > \tau)$
- **Cláusula BN:** $(V_a^L > \tau$ e $V_b^L < \tau$ e $V_c^L > \tau)$ e $(V_a^R > \tau$ e $V_b^R < \tau$ e $V_c^R > \tau)$
- **Cláusula CN:** $(V_a^L > \tau$ e $V_b^L > \tau$ e $V_c^L < \tau)$ e $(V_a^R > \tau$ e $V_b^R > \tau$ e $V_c^R < \tau)$
- **Cláusula ABN:** $(V_a^L < \tau$ e $V_b^L < \tau$ e $V_c^L > \tau)$ ou $(V_a^R < \tau$ e $V_b^R < \tau$ e $V_c^R > \tau)$
- **Cláusula BCN:** $(V_a^L > \tau$ e $V_b^L < \tau$ e $V_c^L < \tau)$ ou $(V_a^R > \tau$ e $V_b^R < \tau$ e $V_c^R < \tau)$

A normalização das correntes, tanto de fase como sequencial, é feita dividindo-se o módulo das correntes pelo módulo da maior corrente, ou seja,

$$I_{maxf} = \max(|I_a|, |I_b|, |I_c|) \quad (3.30)$$

$$i_a = \frac{|I_a|}{I_{maxf}} \quad i_b = \frac{|I_b|}{I_{maxf}} \quad i_c = \frac{|I_c|}{I_{maxf}} \quad (3.31)$$

$$I_{maxseq} = \max(|I_0|, |I_1|, |I_2|) \quad (3.32)$$

$$i_0 = \frac{|I_0|}{I_{maxseq}} \quad i_1 = \frac{|I_1|}{I_{maxseq}} \quad i_2 = \frac{|I_2|}{I_{maxseq}} \quad (3.33)$$

A normalização das tensões é feita utilizando o mesmo critério para a normalização das correntes, ou seja,

$$I_{maxVL} = \max(|V_a^L|, |V_b^L|, |V_c^L|) \quad (3.34)$$

$$v_a^L = \frac{|V_a^L|}{I_{maxVL}} \quad v_b^L = \frac{|V_b^L|}{I_{maxVL}} \quad v_c^L = \frac{|V_c^L|}{I_{maxVL}} \quad (3.35)$$

$$I_{maxVR} = \max(|V_a^R|, |V_b^R|, |V_c^R|) \quad (3.36)$$

$$v_a^R = \frac{|V_a^R|}{I_{maxVR}} \quad v_b^R = \frac{|V_b^R|}{I_{maxVR}} \quad v_c^R = \frac{|V_c^R|}{I_{maxVR}} \quad (3.37)$$

3.3 ALGORITMO DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS

O algoritmo de localização de faltas proposto neste trabalho realiza uma varredura nos trechos da rede, onde, conforme a figura 3.6, cada trecho possui início em zero e termina onde começa outro trecho, para localizar a falta. Como resultado, o algoritmo traz o local de falta, a distância de falta e a resistência de falta.

Uma característica a ser ressaltada neste algoritmo é a não necessidade de se fazer reduções na linha, a fim de se obter uma linha equivalente, para então poder aplicar o método de localização de faltas de um ou dois terminais, sendo o cálculo feito de forma direta, onde o algoritmo de localização de faltas realiza uma varredura nos trechos da rede para determinar o trecho contendor da falta.

O algoritmo é composto por dois blocos, um que controla a varredura na rede e determina o local da falta e outro que determina as informações de falta, como a distância de falta e a impedância de falta. Os dois blocos estão detalhados nos itens 3.3.1 e 3.3.2.

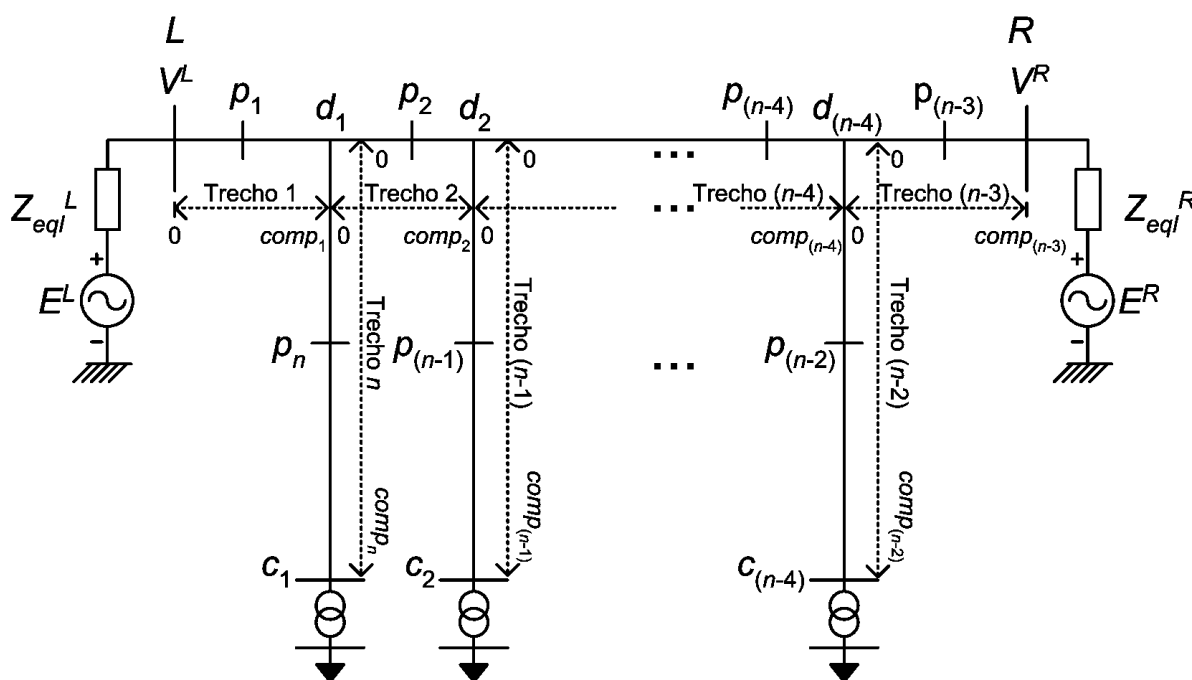


Figura 3.6 – Rede de exemplo, com n trechos, para explicação do algoritmo

3.3.1 Processo de varredura da rede e obtenção do local da falta

Com base na figura 3.6, a varredura da rede inicia-se no trecho 1, onde uma função objetivo, a qual está apresentada em detalhes no item 3.3.2, é chamada conforme o tipo de falta, cuja determinação foi discutida no item 3.2. A função objetivo retorna, então, o erro de a falta estar no trecho 1, a distância de falta, que tem como referência o início deste trecho, e a impedância de falta para este trecho.

Obtida as informações para o trecho 1, passa-se para o trecho 2 e da mesma forma como para o trecho 1, a função objetivo é chamada e retorna o erro de a falta estar no trecho 2, a distância de falta, que tem como referência o início deste trecho, e a impedância de falta. Os erros obtidos para o trecho 1 e para o trecho 2 são, então, comparados, onde caso o erro seja menor para o trecho 1 o trecho 2 é descartado e então passa-se para o próximo trecho, obtêm-se os dados para este próximo trecho e, então, os erros do trecho 1 e deste próximo trecho são comparados, onde caso o erro para este próximo trecho seja menor que o erro para o trecho 1, o trecho 1 é descartado e passa-se para o próximo trecho. Este processo é, então, repetido até o último trecho.

Ao terminar o processo descrito no parágrafo anterior, o local da falta, a distância de falta e a resistência de falta são conhecidos e disponibilizados pelo método de localização de faltas.

O fluxograma da figura 3.7 apresentada o processo de varredura da rede:

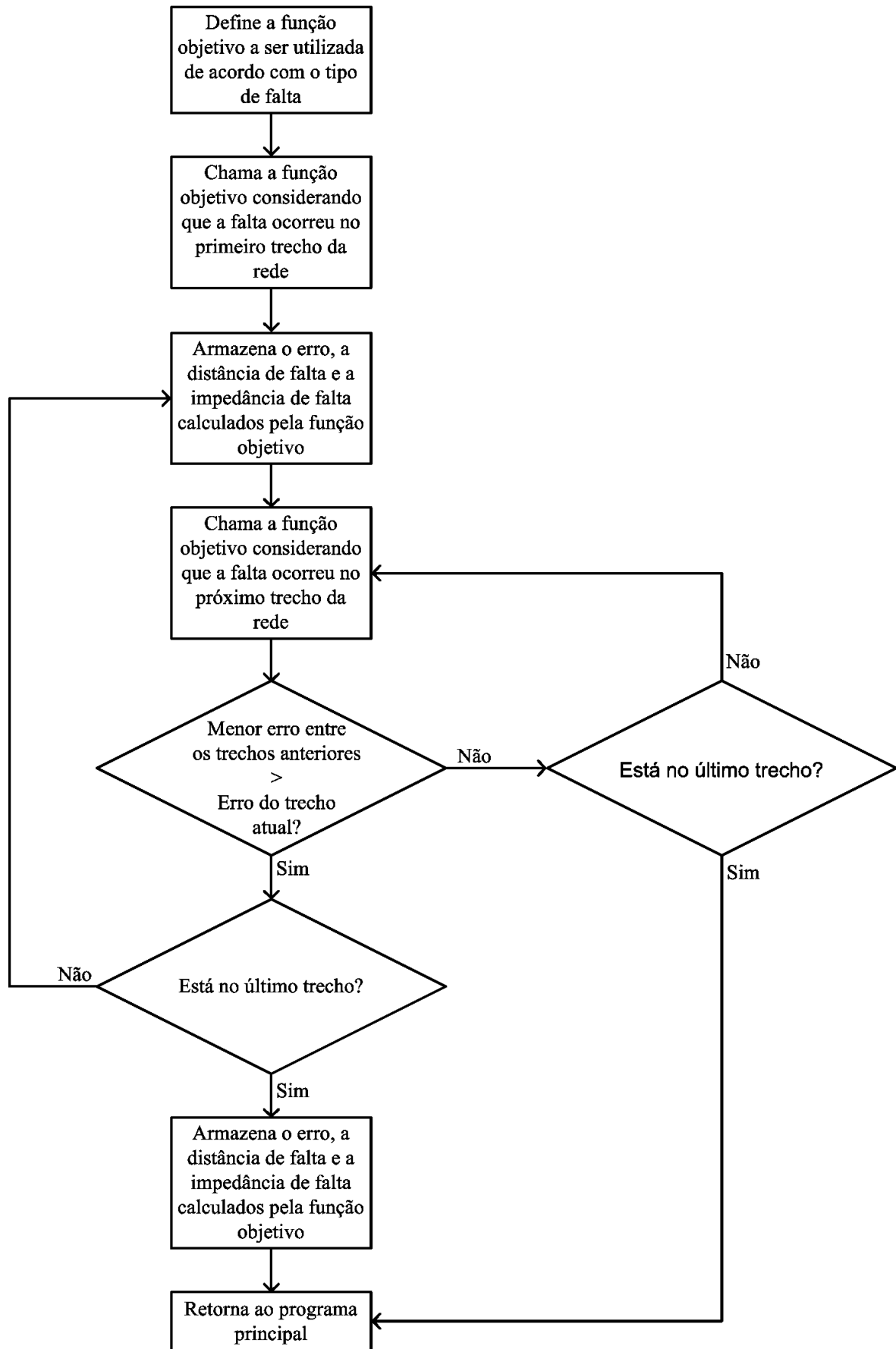


Figura 3.7 – Fluxograma do processo de varredura da rede

3.3.2 Obtenção do erro para o caso de a falta estar no trecho suposto, da distância e da resistência de falta

Para obter o erro de a falta estar em um determinado trecho, a distância e a resistência de falta, foi desenvolvida, para cada tipo de falta, uma função objetivo.

De uma maneira geral, utilizando a rede da figura 3.6 como exemplo e que o processo descrito no item 3.3.1 esteja no trecho 1, a função objetivo pode ser descrita da seguinte forma:

- 1) Entra-se com um valor inicial para o valor de p_1 e da impedância de falta;
- 2) Fixa-se p_2, p_3, \dots, p_n na metade dos seus respectivos trechos, ou seja, $comp_2/2, comp_3/2, \dots, comp_n/2$;
- 3) Calculam-se as matrizes de admitâncias e impedâncias (através da inversa da matriz de admitâncias), de sequência positiva e zero (no caso de faltas que envolvam a terra) considerando, além dos nós formados pelas conexões dos geradores equivalentes, L e R , e das derivações, d_1 a $d_{(n-5)}$, com o tronco da linha e das cargas, c_1 a $c_{(n-5)}$, com as derivações, os pontos p_1 a p_n como nós nas matrizes;
- 4) Calcula-se a tensão de sequência positiva, pré-falta, nos nós definidos no passo 3 através das correntes de Norton injetadas pelos geradores equivalentes e da matriz de impedâncias de sequência positiva;
- 5) Das tensões obtidas no passo 4 considera-se somente a tensão no ponto p_1 ;
- 6) Calcula-se a corrente de falta no ponto p_1 através da tensão de sequência positiva obtida no passo 5, através das impedâncias equivalentes de Thévenin de sequências positiva, negativa (que é igual à impedância de sequência positiva) e zero vistas pelo ponto p_1 e pela impedância de falta, sendo que as impedâncias equivalentes de Thévenin são extraídas das matrizes de sequência positiva e zero. O cálculo da corrente de falta é dependente do tipo de falta, podendo uma ou outra impedância equivalente de Thévenin de sequência positiva, negativa e zero serem utilizadas no cálculo ou não;

- 7) Obtida a corrente de falta, calculam-se, utilizando também as matrizes de sequências positiva e zero (para o caso de faltas que envolvam esta componente) e as correntes de Norton injetadas pelos geradores equivalentes, as tensões sequenciais pós-falta em todos os nós da rede;
- 8) Das tensões obtidas no passo 7 considera-se somente as tensões obtidas para os terminais local e remoto;
- 9) Calculam-se as correntes de sequência positiva, negativa e zero (no caso de falta envolvendo a terra) nos terminais local e remoto, através das tensões sequenciais pós-falta nestes terminais, obtidas no passo 8, e através das impedâncias equivalentes de sequência positiva, negativa (que é igual à positiva) e zero (para faltas que envolvem a terra) dos geradores equivalentes;
- 10) Realiza-se a transformação das tensões e correntes sequenciais pós-falta obtidas nos passos 8 e 9 para tensões e correntes de fase pós-falta;
- 11) Calcula-se o erro relativo entre as tensões pós-falta medidas e calculadas, no passo 10, de ambos os terminais, local e remoto;
- 12) Calcula-se o erro relativo entre as correntes pós-falta medidas e calculadas, no passo 10, de ambos os terminais, local e remoto;
- 13) Somam-se os erros relativos das tensões com os da corrente, obtendo um erro relativo total;
- 14) Minimiza-se o erro relativo total, obtido no passo 13, variando-se o ponto p_1 , dentro do trecho 1, a impedância de falta e repetindo os passos de 3 a 14.

As equações que regem os passos descritos anteriormente são descritas como segue, segundo a rede apresentada na figura 3.6:

a) Equações utilizadas no passo 3

As matrizes de admitâncias de sequência positiva e zero são descritas da seguinte maneira:

$$[Y_{1nós}] = \begin{pmatrix} Y_1^{LL} & -Y_1^{Lp_1} & 0 & \dots & 0 \\ -Y_1^{p_1L} & Y_1^{p_1p_1} & -Y_1^{p_1d_1} & \dots & 0 \\ 0 & -Y_1^{d_1p_1} & Y_1^{d_1d_1} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & Y_1^{c_1c_1} \end{pmatrix} \quad (3.38)$$

$$[Y_{0nós}] = \begin{pmatrix} Y_0^{LL} & -Y_0^{Lp_1} & 0 & \dots & 0 \\ -Y_0^{p_1L} & Y_0^{p_1p_1} & -Y_0^{p_1d_1} & \dots & 0 \\ 0 & -Y_0^{d_1p_1} & Y_0^{d_1d_1} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & Y_0^{c_1c_1} \end{pmatrix} \quad (3.39)$$

As admitâncias de seqüência positiva e zero que constituem as matrizes definidas pelas equações (3.38) e (3.39) são formadas pelas admitâncias e o inverso das impedâncias série dos trechos da linha e pelas admitâncias dos conjuntos formados pelas cargas e os transformadores.

As admitâncias e impedâncias série de seqüência positiva e zero de cada parte dos trechos da rede, ou seja, entre 0 e p e entre p e o comprimento final do trecho ($comp$), conforme visão detalhada mostrada na figura 3.8 de um trecho da rede da figura 3.6, são calculadas da seguinte forma:

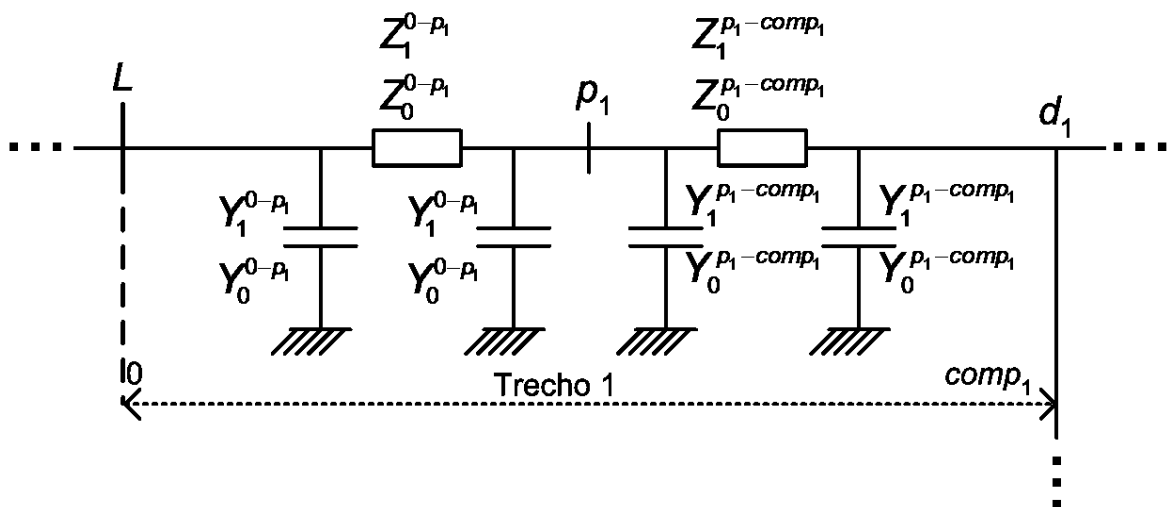


Figura 3.8 – Detalhes do trecho 1 da rede da figura 3.6

Para as admitâncias tem-se:

$$Y_1^{0-p} = \frac{A_1^{0-p} - 1}{B_1^{0-p}} \quad (3.40)$$

$$Y_1^{p-comp} = \frac{A_1^{p-comp} - 1}{B_1^{p-comp}} \quad (3.41)$$

$$Y_0^{0-p} = \frac{A_0^{0-p} - 1}{B_0^{0-p}} \quad (3.42)$$

$$Y_0^{p-comp} = \frac{A_0^{p-comp} - 1}{B_0^{p-comp}} \quad (3.43)$$

Para as impedâncias série tem-se:

$$Z_1^{0-p} = B_1^{0-p} \quad (3.40)$$

$$Z_1^{p-comp} = B_1^{p-comp} \quad (3.41)$$

$$Z_0^{0-p} = B_0^{0-p} \quad (3.42)$$

$$Z_0^{p-comp} = B_0^{p-comp} \quad (3.43)$$

Onde, para as constantes de seqüência positiva:

$$A_1^{0-p} = \cosh(\gamma_1^{trecho} p) \quad (3.44)$$

$$B_1^{0-p} = Zc_1^{trecho} \sinh(\gamma_1^{trecho} p) \quad (3.45)$$

$$A_1^{p-comp} = \cosh[\gamma_1^{trecho} (comp - p)] \quad (3.46)$$

$$B_1^{p-comp} = Zc_1^{trecho} \sinh[\gamma_1^{trecho} (comp - p)] \quad (3.47)$$

E, para as constantes de seqüência zero:

$$A_0^{0-p} = \cosh(\gamma_0^{trecho} p) \quad (3.48)$$

$$B_0^{0-p} = Zc_0^{trecho} \sinh(\gamma_0^{trecho} p) \quad (3.49)$$

$$A_0^{p-comp} = \cosh[\gamma_0^{trecho} (comp - p)] \quad (3.50)$$

$$B_0^{p-comp} = Zc_0^{trecho} \sinh[\gamma_0^{trecho} (comp - p)] \quad (3.51)$$

Os parâmetros de cada trecho, γ_1^{trecho} , ZC_1^{trecho} , γ_0^{trecho} e ZC_0^{trecho} são descritos pelas seguintes equações:

$$\gamma_1^{trecho} = \sqrt{Z_1^{trecho} y_1^{trecho}} \quad (3.52)$$

$$ZC_1^{trecho} = \sqrt{\frac{Z_1^{trecho}}{y_1^{trecho}}} \quad (3.53)$$

$$\gamma_0^{trecho} = \sqrt{Z_0^{trecho} y_0^{trecho}} \quad (3.54)$$

$$ZC_0^{trecho} = \sqrt{\frac{Z_0^{trecho}}{y_0^{trecho}}} \quad (3.55)$$

As cargas são consideradas como sendo de impedância constante, podendo as impedâncias estar ligadas em delta, estrela solidamente aterrada, estrela isolada e estrela aterrada através de impedância. Neste trabalho optou-se em utilizar as cargas ligadas em estrela isolada.

Os valores das impedâncias das cargas são estimados conforme o algoritmo de estimativa de cargas apresentado no item 3.1.

A configuração do conjunto das impedâncias de sequência positiva e zero dos transformadores com as impedâncias das cargas utilizadas nas matrizes de admitâncias de sequência positiva e zero da rede dependem do tipo de ligação dos transformadores, as quais podem ser estrela aterrada/estrela aterrada, delta/estrela aterrada e, para transformadores com três enrolamentos, estrela aterrada/delta/estrela aterrada.

A seguir serão apresentadas as configurações do conjunto carga-transformador baseadas na referência (OLIVEIRA et al., 2000):

- **Conjunto carga-transformador com ligação estrela aterrada / estrela aterrada**

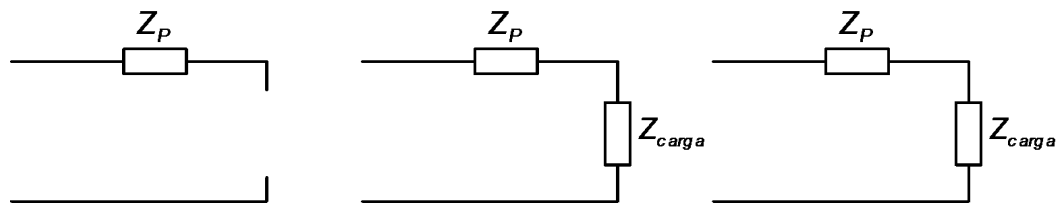


Figura 3.9 – Diagramas de sequência zero, positiva e negativa para a ligação estrela aterrada/estrela aterrada

As equações das admitâncias para os diagramas de sequência zero, positiva e negativa apresentados na figura 3.9 são:

$$Y_0^{CT} = 0 \quad (3.56)$$

$$Y_1^{CT} = Y_2^{CT} = \frac{1}{Z_P + Z_{carga}} \quad (3.57)$$

Onde:

Z_P é a impedância de curto-circuito do transformador referida ao primário.

- **Conjunto carga-transformador com ligação delta / estrela aterrada**

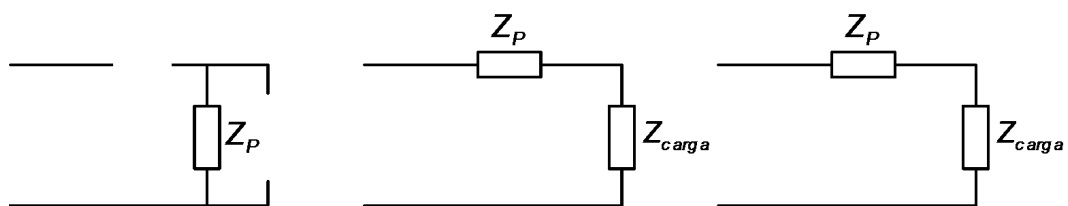


Figura 3.10 – Diagramas de sequência zero, positiva e negativa para a ligação delta/estrela aterrada

As equações das admitâncias para os diagramas de sequência zero, positiva e negativa apresentados na figura 3.10 são:

$$Y_0^{CT} = 0 \quad (3.58)$$

$$Y_1^{CT} = Y_2^{CT} = \frac{1}{Z_P + Z_{carga}} \quad (3.59)$$

Onde:

Z_P é a impedância de curto-circuito do transformador referida ao primário.

- **Conjunto carga-transformador com ligação estrela aterrada / delta / estrela aterrada**

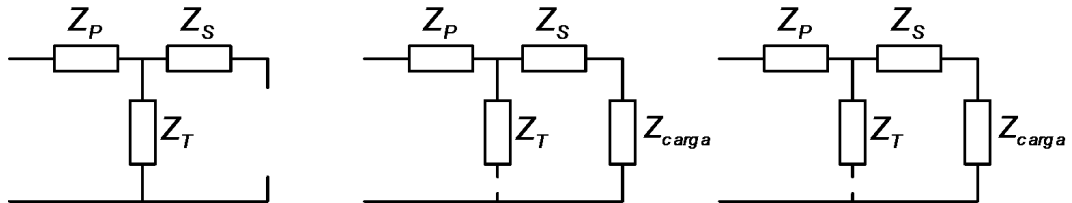


Figura 3.11 – Diagramas de seqüência zero, positiva e negativa para a ligação delta/estrela aterrada

As equações das admitâncias para os diagramas de seqüência zero, positiva e negativa apresentados na figura 3.11 são:

$$Y_0^{CT} = \frac{1}{Z_P + Z_T} \quad (3.60)$$

$$Y_1^{CT} = Y_2^{CT} = \frac{1}{Z_P + Z_S + Z_{carga}} \quad (3.61)$$

Sendo:

$$Z_P = \frac{Z_{PS} + Z_{PT} - Z_{ST}}{2} \quad (3.62)$$

$$Z_S = \frac{Z_{ST} + Z_{PS} - Z_{PT}}{2} \quad (3.63)$$

$$Z_T = \frac{Z_{PT} + Z_{ST} - Z_{PS}}{2} \quad (3.64)$$

Onde:

Z_{PS} é a impedância de curto-circuito entre o primário e o secundário;

Z_{ST} é a impedância de curto-circuito entre o secundário e o terciário;

Z_{PT} é a impedância de curto-circuito entre o primário e o terciário;

As matrizes de admitâncias de sequência positiva e zero são, então, invertidas obtendo-se as matrizes de impedâncias de sequência positiva e zero da rede, conforme mostra as equações (3.56) e (3.57).

$$[Z_{1nós}] = [Y_{1nós}]^{-1} = \begin{pmatrix} Z_1^{LL} & Z_1^{L\rho_1} & Z_1^{Ld_1} & \dots & Z_1^{Lc_1} \\ Z_1^{\rho_1L} & Z_1^{\rho_1\rho_1} & Z_1^{\rho_1d_1} & \dots & Z_1^{\rho_1c_1} \\ Z_1^{d_1L} & Z_1^{d_1\rho_1} & Z_1^{d_1d_1} & \dots & Z_1^{d_1c_1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_1^{c_1L} & Z_1^{c_1\rho_1} & Z_1^{c_1d_1} & \dots & Z_1^{c_1c_1} \end{pmatrix} \quad (3.65)$$

$$[Z_{0nós}] = [Y_{0nós}]^{-1} = \begin{pmatrix} Z_0^{LL} & Z_0^{L\rho_1} & Z_0^{Ld_1} & \dots & Z_0^{Lc_1} \\ Z_0^{\rho_1L} & Z_0^{\rho_1\rho_1} & Z_0^{\rho_1d_1} & \dots & Z_0^{\rho_1c_1} \\ Z_0^{d_1L} & Z_0^{d_1\rho_1} & Z_0^{d_1d_1} & \dots & Z_0^{d_1c_1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_0^{c_1L} & Z_0^{c_1\rho_1} & Z_0^{c_1d_1} & \dots & Z_0^{c_1c_1} \end{pmatrix} \quad (3.66)$$

Onde, as impedâncias na diagonal principal das matrizes de sequência positiva e zero são as impedâncias vistas por cada um dos nós da rede, ou seja, são as impedâncias equivalentes de Thévenin da rede vistas por cada um dos nós.

b) Equações utilizadas nos passos 4 e 5

As tensões de sequência positiva pré-falta nos nós da rede são calculadas da seguinte forma:

$$[V_{1nós}]_{précalc} = [Z_{1nós}] \left[I_1^{NL} \ 0 \ 0 \ \dots \ I_1^{NR} \ 0 \ 0 \ \dots \ 0 \right]^T \quad (3.67)$$

Onde I_1^{NL} e I_1^{NR} são as correntes de Norton injetadas na linha pelos geradores equivalentes e são calculadas conforme as equações (3.68) e (3.69).

$$I_1^{NL} = \frac{E_1^L}{Z_{1eq}^L} \quad (3.68)$$

$$I_1^{NR} = \frac{E_1^R}{Z_{1eq}^R} \quad (3.69)$$

Como descrito no passo 5, a tensão no ponto p_1 é extraída a partir das tensões obtidas pela eq.(3.67):

$$V_{1précalc}^{p_1} = [V_{1nós}]_{précalc} \text{ (posição do nó } p_1 \text{ no vetor)} \quad (3.70)$$

c) Equações utilizadas no passo 6

O cálculo da corrente de falta é dependente do tipo de falta ocorrido (OLIVEIRA et al., 2000), ou seja, faltas fase-terra, faltas dupla-fase-terra, faltas dupla-fase e falta trifásica. Devido a este fato a função objetivo é alterada de acordo com os tipos de falta mencionados anteriormente.

Serão mostrados os cálculos somente para faltas fase A-terra, faltas BC-terra, faltas BC e faltas ABC, pois os cálculos para os demais tipos de falta basta que sejam feitas as rotações de fase apropriadas.

Os cálculos das componentes sequenciais das correntes de falta a seguir são baseados na referência (OLIVEIRA et al., 2000):

• **Cálculo da corrente de falta para faltas fase A-terra:**

A corrente de falta para faltas fase A-terra possui todas as componentes sequenciais não-nulas, ou seja, ela é constituída pelas componentes de sequência positiva, negativa e zero.

A eq.(3.71) mostra como é feito o cálculo das componentes sequenciais da corrente de falta no ponto p_1 :

$$I_0^{falta} = \frac{V_{1précalc}^{p_1}}{2Z_1^{p_1p_1} + Z_0^{p_1p_1} + 3R_f} \quad (3.71)$$

As componentes de sequência positiva e negativa da corrente de falta, I_1^{falta} e I_2^{falta} , são idênticas à componente de sequência zero calculada pela eq.(3.71).

• **Cálculo da corrente de falta para faltas BC-terra:**

A corrente de falta para faltas BC-terra também possui todas as componentes sequenciais não-nulas, ou seja, ela é constituída pelas componentes de sequência positiva, negativa e zero.

A eq.(3.72), eq.(3.73) e eq.(3.74) mostram como é feito o cálculo das componentes sequenciais da corrente de falta no ponto p_1 :

$$I_0^{falta} = \frac{-y_0^f y_1^f V_{1précalc}^{p_1}}{2y_1^f + y_0^f} \quad (3.72)$$

$$I_1^{falta} = \frac{(y_0^f + y_1^f) y_1^f V_{1précalc}^{p_1}}{2y_1^f + y_0^f} \quad (3.73)$$

$$I_2^{falta} = \frac{-y_1^{f2} V_{1précalc}^{p_1}}{2y_1^f + y_0^f} \quad (3.74)$$

Onde:

$$y_0^f = \frac{1}{Z_0^{p_1 p_1} + R_f} \quad (3.75)$$

e

$$y_1^f = \frac{1}{Z_1^{p_1 p_1} + R_f} \quad (3.76)$$

- **Cálculo da corrente de falta para faltas BC:**

A corrente de falta para faltas BC possui somente as componentes de sequência positiva e negativa não-nulas, ou seja, ela é constituída apenas pelas componentes de sequência positiva e negativa.

A eq.(3.77) mostra como é feito o cálculo da componente de sequência positiva da corrente de falta no ponto p_1 , sendo a componente de sequência negativa idêntica, mas de sentido contrário, à componente de sequência positiva:

$$I_1^{falta} = \frac{V_{1précalc}^{p_1}}{2Z_1^{p_1 p_1} + R_f} \quad (3.77)$$

- **Cálculo da corrente de falta para faltas ABC:**

A corrente de falta para faltas ABC possui somente a componente de sequência positiva não-nula, ou seja, ela é constituída apenas pela componente de sequência positiva.

A eq.(3.78) mostra como é feito o cálculo da componente de sequência positiva da corrente de falta no ponto p_1 :

$$I_1^{falta} = \frac{V_{1p_1}^{précalc}}{Z_1^{p_1p_1} + R_f} \quad (3.78)$$

d) Equações utilizadas no passo 7

O cálculo das componentes sequenciais das tensões pós-falta nos nós da rede também são dependentes do tipo de falta.

Como no caso das equações do passo 6, serão mostradas somente as equações para as faltas fase A-terra, faltas BC-terra, faltas BC e faltas ABC.

• **Cálculo das tensões sequenciais pós-falta para faltas fase A-terra:**

Calculada as componentes sequenciais da corrente de falta para o caso de faltas fase A-terra, as componentes sequenciais das tensões pós-falta nos nós podem ser determinadas pelas seguintes equações:

$$[V_{0nós}]_{póscalc} = [Z_{0nós}] \begin{bmatrix} 0 & -I_0^{falta} & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}^T \quad (3.79)$$

$$[V_{1nós}]_{póscalc} = [Z_{1nós}] \begin{bmatrix} I_1^{NL} & -I_0^{falta} & 0 & \dots & I_1^{NR} & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}^T \quad (3.80)$$

$$[V_{2nós}]_{póscalc} = [Z_{1nós}] \begin{bmatrix} 0 & -I_0^{falta} & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}^T \quad (3.81)$$

• **Cálculo das tensões sequenciais pós-falta para faltas BC-terra:**

Calculada as componentes sequenciais da corrente de falta para o caso de faltas BC-terra, as componentes sequenciais das tensões pós-falta nos nós podem ser determinadas pelas seguintes equações:

$$[V_{0nós}]_{póscalc} = [Z_{0nós}] \begin{bmatrix} 0 & -I_0^{falta} & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}^T \quad (3.82)$$

$$[V_{1nós}]_{póscalc} = [Z_{1nós}] \begin{bmatrix} I_1^{NL} & -I_1^{falta} & 0 & \dots & I_1^{NR} & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}^T \quad (3.83)$$

$$[V_{2nós}]_{póscalc} = [Z_{1nós}] \begin{bmatrix} 0 & -I_2^{falta} & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}^T \quad (3.84)$$

- **Cálculo das tensões sequenciais pós-falta para faltas BC:**

Calculada as componentes sequenciais da corrente de falta para o caso de faltas BC, as componentes sequenciais das tensões pós-falta nos nós podem ser determinadas pelas seguintes equações:

$$[V_{0nós}]_{pós\text{calc}} = 0 \quad (3.85)$$

$$[V_{1nós}]_{pós\text{calc}} = [Z_{1nós}] \begin{bmatrix} I_1^{NL} & -I_1^{falta} & 0 & \dots & I_1^{NR} & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}^T \quad (3.86)$$

$$[V_{2nós}]_{pós\text{calc}} = [Z_{1nós}] \begin{bmatrix} 0 & I_1^{falta} & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}^T \quad (3.87)$$

- **Cálculo das tensões sequenciais pós-falta para faltas ABC:**

Calculada as componentes sequenciais da corrente de falta para o caso de faltas ABC, as componentes sequenciais das tensões pós-falta nos nós podem ser determinadas pelas seguintes equações:

$$[V_{0nós}]_{pós\text{calc}} = 0 \quad (3.88)$$

$$[V_{1nós}]_{pós\text{calc}} = [Z_{1nós}] \begin{bmatrix} I_1^{NL} & -I_1^{falta} & 0 & \dots & I_1^{NR} & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}^T \quad (3.89)$$

$$[V_{2nós}]_{pós\text{calc}} = 0 \quad (3.90)$$

e) Equações utilizadas nos passos 8 e 9

Calculadas as componentes sequenciais das tensões nos nós da rede para um determinado tipo de falta, obtêm-se as tensões sequenciais nos terminais, local e remoto, da seguinte forma:

Para o terminal local:

$$V_{0pós\text{calc}}^L = [V_{0nós}]_{pós\text{calc}} \text{ (posição do nó } L \text{ no vetor)} \quad (3.91)$$

$$V_{1pós\text{calc}}^L = [V_{1nós}]_{pós\text{calc}} \text{ (posição do nó } L \text{ no vetor)} \quad (3.92)$$

$$V_{2pós\text{calc}}^L = [V_{2nós}]_{pós\text{calc}} \text{ (posição do nó } L \text{ no vetor)} \quad (3.93)$$

Para o terminal remoto:

$$V_{0pós\text{calc}}^R = [V_{0nós}]_{pós\text{calc}} \text{ (posição do nó } R \text{ no vetor)} \quad (3.94)$$

$$V_{1póscal}^R = [V_{1nós}]_{póscal} \text{ (posição do nó } R \text{ no vetor)} \quad (3.95)$$

$$V_{2póscal}^R = [V_{2nós}]_{póscal} \text{ (posição do nó } R \text{ no vetor)} \quad (3.96)$$

Através das tensões obtidas nas equações de (3.91) a (3.96) e das impedâncias equivalentes dos geradores, calculam-se as correntes sequenciais nos terminais local e remoto da seguinte forma:

Para o terminal local:

$$I_{0póscal}^L = \frac{-V_{0póscal}^L}{Z_{0eq}^L} \quad (3.97)$$

$$I_{1póscal}^L = I_1^{NL} - \frac{V_{1póscal}^L}{Z_{1eq}^L} \quad (3.98)$$

$$I_{2póscal}^L = \frac{-V_{2póscal}^L}{Z_{1eq}^L} \quad (3.99)$$

Para o terminal remoto:

$$I_{0póscal}^R = \frac{-V_{0póscal}^R}{Z_{0eq}^R} \quad (3.100)$$

$$I_{1póscal}^R = I_1^{NR} - \frac{V_{1póscal}^R}{Z_{1eq}^R} \quad (3.101)$$

$$I_{2póscal}^R = \frac{-V_{2póscal}^R}{Z_{1eq}^R} \quad (3.102)$$

f) Equações utilizadas no passo 10

A transformação das tensões e correntes sequenciais pós-falta, calculadas em ambos os terminais, local e remoto, é feita da seguinte forma:

Para o terminal local:

$$[V_{abc}]_{póscal}^L = T \begin{bmatrix} V_{0póscal}^L & V_{1póscal}^L & V_{2póscal}^L \end{bmatrix}^T \quad (3.103)$$

$$[I_{abc}]_{póscal}^L = T \begin{bmatrix} I_{0póscal}^L & I_{1póscal}^L & I_{2póscal}^L \end{bmatrix}^T \quad (3.104)$$

Para o terminal remoto:

$$[V_{abc}]_{p\acute{o}scal}^R = T \begin{bmatrix} V_{0p\acute{o}scal}^R & V_{1p\acute{o}scal}^R & V_{2p\acute{o}scal}^R \end{bmatrix}^T \quad (3.105)$$

$$[I_{abc}]_{p\acute{o}scal}^R = T \begin{bmatrix} I_{0p\acute{o}scal}^R & I_{1p\acute{o}scal}^R & I_{2p\acute{o}scal}^R \end{bmatrix}^T \quad (3.106)$$

Onde T , que multiplica as equações, é a matriz de transformação e é descrita como segue:

$$T = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{pmatrix} \quad (3.107)$$

g) Equações utilizadas nos passos 11, 12 e 13

Os erros relativos das tensões de fase pós-falta de ambos os terminais, local e remoto, são calculados pela seguinte equação:

$$Erro_V^L = \left| \frac{V_{ap\acute{o}sm}^L - V_{ap\acute{o}scal}^L}{V_{ap\acute{o}sm}^L} \right| + \left| \frac{V_{bp\acute{o}sm}^L - V_{bp\acute{o}scal}^L}{V_{bp\acute{o}sm}^L} \right| + \left| \frac{V_{cp\acute{o}sm}^L - V_{cp\acute{o}scal}^L}{V_{cp\acute{o}sm}^L} \right| \quad (3.108)$$

$$Erro_V^R = \left| \frac{V_{ap\acute{o}sm}^R - V_{ap\acute{o}scal}^R}{V_{ap\acute{o}sm}^R} \right| + \left| \frac{V_{bp\acute{o}sm}^R - V_{bp\acute{o}scal}^R}{V_{bp\acute{o}sm}^R} \right| + \left| \frac{V_{cp\acute{o}sm}^R - V_{cp\acute{o}scal}^R}{V_{cp\acute{o}sm}^R} \right| \quad (3.109)$$

Então, somando os erros relativos das tensões de fase pós-falta de cada terminal, tem-se o erro relativo total das tensões de fase:

$$Erro_V = Erro_V^L + Erro_V^R \quad (3.110)$$

Para as correntes de fase pós-falta tem-se:

$$Erro_I^L = \left| \frac{I_{ap\acute{o}sm}^L - I_{ap\acute{o}scal}^L}{I_{ap\acute{o}sm}^L} \right| + \left| \frac{I_{bp\acute{o}sm}^L - I_{bp\acute{o}scal}^L}{I_{bp\acute{o}sm}^L} \right| + \left| \frac{I_{cp\acute{o}sm}^L - I_{cp\acute{o}scal}^L}{I_{cp\acute{o}sm}^L} \right| \quad (3.111)$$

$$Erro_I^R = \left| \frac{I_{ap\acute{o}sm}^R - I_{ap\acute{o}scal}^R}{I_{ap\acute{o}sm}^R} \right| + \left| \frac{I_{bp\acute{o}sm}^R - I_{bp\acute{o}scal}^R}{I_{bp\acute{o}sm}^R} \right| + \left| \frac{I_{cp\acute{o}sm}^R - I_{cp\acute{o}scal}^R}{I_{cp\acute{o}sm}^R} \right| \quad (3.112)$$

Somando os erros relativos das correntes de fase pós-falta de cada terminal, tem-se o erro relativo total das correntes de fase:

$$Erro_I = Erro_I^L + Erro_I^R \quad (3.113)$$

O erro relativo total a ser minimizado pela função objetivo é obtido somando-se os erros relativos totais de tensões e correntes:

$$Erro_{tot} = Erro_V + Erro_I \quad (3.114)$$

Os passos descritos anteriormente estão mostrados no fluxograma da figura 3.12.

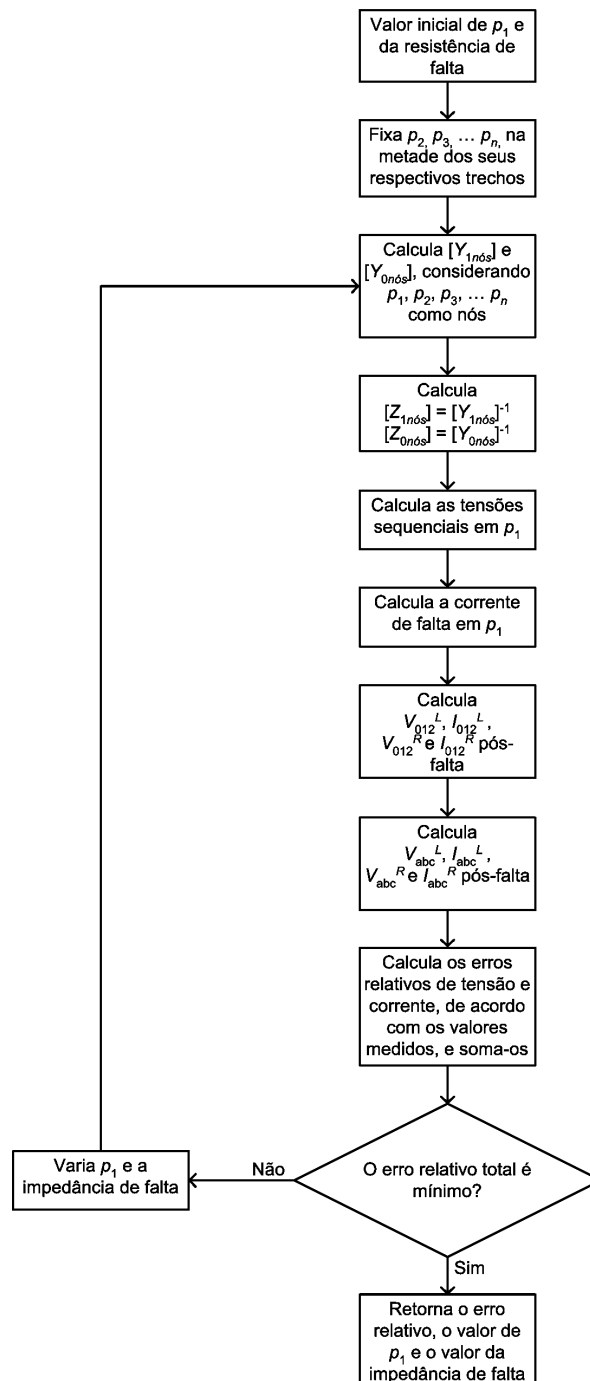


Figura 3.12 – Fluxograma dos passos da função objetivo

No fluxograma apresentado pela figura 3.12, basta considerar as componentes de sequência zero nulas para faltas que não envolvem a terra.

Os passos apresentados anteriormente e suas respectivas equações são descritos com base no trecho 1 apenas para facilitar a explanação do algoritmo de localização de faltas, sendo, portanto, válidos para todos os trechos da rede.

4 ANÁLISE DE DESEMPENHO DO MÉTODO DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS PROPOSTO

Para analisar o desempenho do método de localização de faltas proposto neste trabalho, foram feitas várias simulações de faltas através do programa *Alternative Transient Program - ATP*, o qual após a simulação gera um arquivo de dados equivalente a uma oscilografia digital. Os dados são, então, utilizados em uma rotina de pós-processamento, implementada no software MATLAB (MATHWORKS, 1992), que realiza a filtragem digital dos mesmos para a obtenção dos fasores a 60 Hz das tensões e correntes pré-falta e pós-falta, necessários para obtenção dos dados de falta, como o tipo de falta, o local e a distância de ocorrência da falta e a resistência de falta. Os dados dos terminais, local e remoto, são considerados sincronizados via GPS.

O desempenho do método de localização de faltas será analisado com base na variação de uma série de fatores, tais como:

- Variação da distância de falta em cada trecho da rede;
- Faltas próximas aos pontos de derivação;
- Variação do tipo de falta;
- Variação da resistência de falta;
- Erros nos fasores de tensão e corrente;
- Erros nos parâmetros da linha.

A análise do desempenho do método de localização de faltas proposto e os resultados gerados pela análise estão apresentados no item 4.2.

No item 4.2 são apresentados, também, a análise de eficiência na obtenção dos fasores de tensão e corrente, pré-falta e pós-falta, e a análise de eficiência do algoritmo de estimativa das cargas, onde as cargas conectadas em cada derivação possuem valores diferentes.

Para realizar a análise do desempenho do método de localização de faltas proposto, foi utilizada uma rede com derivações, cuja configuração e parâmetros estão apresentados no item 4.1.

4.1 ESTRUTURA DA REDE SIMULADA

Para analisar o desempenho do método de localização de faltas proposto neste trabalho foi utilizada a configuração de rede mostrada na figura 4.1, a qual foi implementada no programa ATP.

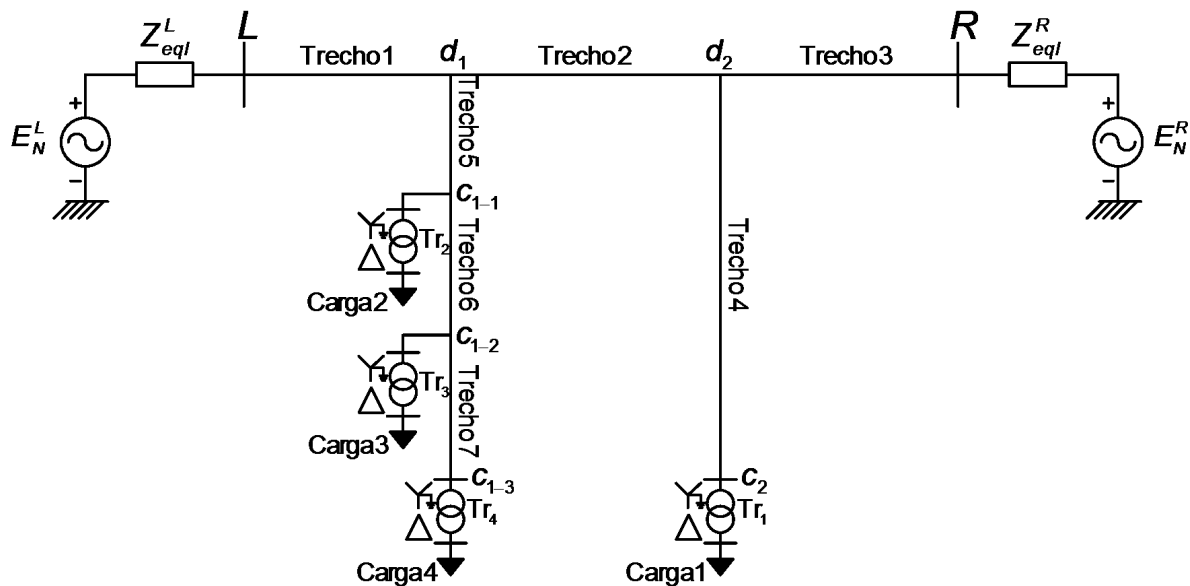


Figura 4.1 – Rede utilizada para teste do método de localização de faltas proposto

A rede apresentada na figura 4.1 possui as configurações descritas pelos itens 4.1.1, 4.1.2, 4.1.3 e 4.1.4 os quais correspondem, respectivamente, às configurações da linha de transmissão, aos transformadores ligados às cargas, às cargas e aos geradores equivalentes utilizados na rede.

4.1.1 Configurações da linha de transmissão

A linha de transmissão utilizada na rede da figura 4.1, possui os dados:

- Tensão nominal de 138 (kV);
- Continuamente transposta em todos os trechos;
- Circuito simples;

- Características dos cabos condutores e do cabo-guarda indicados na tabela 4.1:

Tabela 4.1 – Características dos cabos condutores e do cabo-guarda

Cabo	Tipo	Diâmetro externo (cm)	Resistência (50°C) (Ω/km)	Flecha (50°C) (m)
Condutor	Linnet	1,8313	0,1827	7,73
Guarda	HS – 7fios	0,9525	4,0389	6,96

- Característica da torre:

A torre utilizada na rede de transmissão possui a geometria apresentada na figura 4.2.

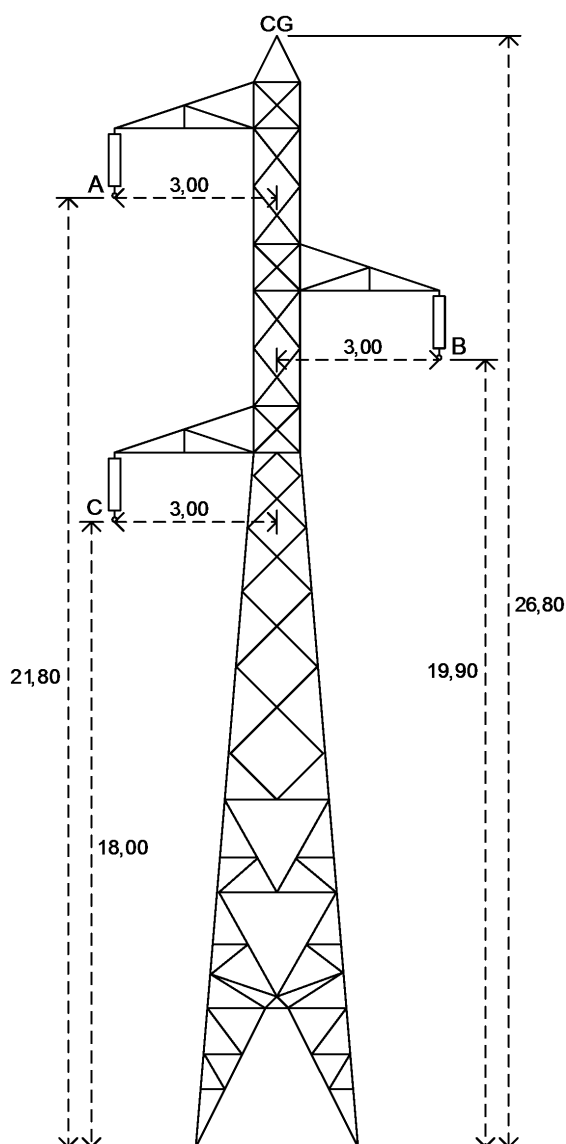


Figura 4.2 – Geometria da torre utilizada na rede de transmissão simulada

- Resistividade do solo admitida sendo 1000 (Ωm);
- Parâmetros da linha obtidos através da subrotina LINE CONSTANTS do ATP:
 - Parâmetros de sequência positiva:

$$R_1 = 0,18307 \Omega/\text{km} \quad X_1 = 0,495 \Omega/\text{km} \quad C_1 = 8,797 \text{nF}/\text{km}$$

- Parâmetros de sequência zero:

$$R_0 = 0,4654 \Omega/\text{km} \quad X_0 = 1,841 \Omega/\text{km} \quad C_0 = 5,014 \text{nF}/\text{km}$$

4.1.2 Transformadores ligados às cargas

Os transformadores ligados às cargas conectadas na rede possuem as seguintes características:

Tabela 4.2 – Características dos transformadores

Transformador	Tipo de ligação	Tensão (kV)	X _{cc} (%)	Potência nominal (MVA)
<i>Tr1 a Tr4</i>	Estrela aterrada / delta	138:13,8	10	30

Os transformadores são ligados conforme a tabela 4.2 para avaliar o algoritmo frente às contribuições dos transformadores na corrente de curto-circuito, sendo este o pior caso para faltas que envolvam a terra.

4.1.3 Cargas conectadas à rede

As cargas conectadas na rede possuem as seguintes potências:

Tabela 4.3 – Cargas conectadas à rede

Carga	Potência (MVA)
1	$10 \angle 36,87^\circ$
2	$7 \angle 23,07^\circ$
3	$7,94 \angle 18,19^\circ$
4	$12,7 \angle 25,84^\circ$

4.1.4 Parâmetros dos equivalentes

Os geradores equivalentes dos terminais, local e remoto, possuem os seguintes parâmetros:

- Tensão interna do gerador do terminal local: $138 \angle 0^\circ$ kV;
- Tensão interna do gerador do terminal remoto: $138 \angle 20^\circ$ kV;
- Potências de curto-circuito e impedância equivalente de sequência positiva:

Tabela 4.4 – Parâmetros de sequência positiva dos geradores equivalentes

Terminal local		Terminal remoto	
Potência de curto-circuito trifásico (GVA)	$0,97 \angle 84,14^\circ$	Potência de curto-circuito trifásico (GVA)	$2,23 \angle 83,29^\circ$
Potência de curto-circuito fase-terra (GVA)	$0,72 \angle 83,46^\circ$	Potência de curto-circuito fase-terra (GVA)	$1,60 \angle 83,57^\circ$
Impedância equivalente (Ω)	$2 + j19,5$	Impedância equivalente (Ω)	$1 + j8,5$

- Impedância equivalente de sequência zero:

Tabela 4.5 – Parâmetros de sequência zero dos geradores equivalentes

Terminal local		Terminal remoto	
Impedância equivalente (Ω)	$5 + j39,5$	Impedância equivalente (Ω)	$2 + j18,5$

4.2 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

Neste item estão apresentados os resultados das simulações realizadas com o objetivo de avaliar a eficiência do método de obtenção dos fasores de tensão e corrente, do algoritmo de estimativa das cargas e do algoritmo de localização de faltas proposto neste trabalho.

Para avaliação do método de obtenção dos fasores de tensão e corrente, foram feitas simulações de faltas fase-terra e trifásicas no trecho 2 da rede da figura 4.1.

Para avaliação do algoritmo de estimativa de cargas foram feitas simulações de faltas fase-terra e trifásicas nos trechos 2, 4 e 6 da rede da figura 4.1, uma vez que o algoritmo de estimativa de cargas necessita dos dados de tensão e corrente pré-falta e pós-falta para estimar as cargas.

Para a avaliação do algoritmo de localização de faltas, foram realizadas as seguintes simulações:

- **Variação da distância de falta**

Para cada tipo de falta, falta fase-terra (AN), dupla-fase-terra (BCN), falta dupla-fase (BC) e trifásica, foram simuladas três variações de distância de falta para cada trecho da rede da figura 4.1, e também faltas nos pontos de conexão das derivações com a linha principal, totalizando 108 simulações.

- **Variação do tipo de falta**

Foram simulados todos os tipos de falta, AN, BN, CN, ABN, BCN, CAN, AB, BC, CA e ABC, nos trechos 2, 4 e 6 com as distâncias de 50 km em relação ao terminal local, 35 km em relação ao início da derivação 2 e 50 km em relação ao início da derivação 1, respectivamente, totalizando 30 simulações.

- **Variação da resistência de falta**

Foram simuladas para cada tipo de falta, falta fase-terra (AN), dupla-fase-terra (BCN), falta dupla-fase (BC) e trifásica, contendo resistências de falta de 1, 5, 10 e 20 Ω , nos trechos 2, 4 e 6 com as distâncias de 50 km em relação ao terminal local,

35 km em relação ao início da derivação 2 e 50 km em relação ao início da derivação 1, respectivamente, totalizando 48 simulações.

- **Erros nos fasores de tensão e corrente e nos parâmetros da linha**

Para cada tipo de falta, falta fase-terra (AN), dupla-fase-terra (BCN), falta dupla-fase (BC) e trifásica, foram realizadas 30 simulações para erros nos fasores de tensão e corrente, pré-falta e pós-falta, e 30 simulações para erros nos parâmetros da linha, nos trechos 2, 4 e 6 com as distâncias de 50 km em relação ao terminal local, 35 km em relação ao início da derivação 2 e 50 km em relação ao início da derivação 1, respectivamente, totalizando 720 simulações.

Considerando todos os casos de simulação do algoritmo de localização de faltas, descritos anteriormente, foi realizado um total de 906 simulações.

4.2.1 Avaliação do método de obtenção dos fasores

A obtenção dos fasores de tensão e corrente, pré-falta e pós-falta, neste trabalho foi feita através de filtragem digital utilizando um filtro MMQ em série com um filtro passa-baixas de Butterworth de 3ª ordem, conforme apresentado no capítulo 2.

Para avaliar o método de obtenção dos fasores, os fasores obtidos pelo método de localização de faltas foram comparados aos fasores calculados pelo ATP.

A seguir estão apresentados os resultados da simulação para:

- **Falta fase-terra (AN) e falta trifásica, ambas com resistência de falta de 5 Ω a 50 km do terminal local no trecho 2.**

Tabela 4.6 – Fasores de tensão e corrente, pré-falta e pós-falta, nos terminais local e remoto para faltas fase-terra e trifásica

		Terminal local		Terminal remoto		
		Fasores calculados pelo método	Fasores calculados pelo ATP	Fasores calculados pelo método	Fasores calculados pelo ATP	
Falta fase-terra (AN)	Tensão pré-falta (V)	A	77285 \angle 3,84°	77489 \angle 3,89°	79327 \angle 17,50°	79536 \angle 17,55°
		B	77285 \angle -116,16°	77489 \angle -116,11°	79326 \angle -102,50°	79536 \angle -102,45°
		C	77285 \angle 123,84°	77489 \angle 123,89°	79326 \angle -137,50°	79536 \angle 137,55°
	Corrente pré-falta (A)	A	293,10 \angle 30,04°	293,87 \angle 30,08°	397,31 \angle -156,88°	398,36 \angle -156,84°
		B	293,09 \angle -89,96°	293,87 \angle -89,92°	397,30 \angle 83,12°	398,36 \angle 83,16°
		C	293,09 \angle 150,04°	293,87 \angle 150,08°	397,31 \angle -36,88°	398,36 \angle -36,84°
	Tensão pós-falta (V)	A	55241 \angle -5,41°	55374 \angle -5,41°	65192 \angle 15,35°	65416 \angle 15,43°
		B	80736 \angle -117,72°	80950 \angle -117,69°	81062 \angle -103,83°	81335 \angle -103,79°
		C	77589 \angle -126,85°	77809 \angle 126,90°	80141 \angle 139,24°	80330 \angle 139,32°
	Corrente pós-falta (A)	A	1005,4 \angle 104,13°	1007,8 \angle 104,16°	1391,7 \angle 139,76°	1395,1 \angle 139,80°
		B	367,9 \angle -86,63°	368,8 \angle -86,60°	316,7 \angle 71,45°	317,6 \angle 71,48°
		C	243,5 \angle 162,74°	244,2 \angle 162,77°	498,2 \angle -41,88°	499,6 \angle -41,83°
Falta trifásica	Tensão pós-falta (V)	A	52321 \angle -11,29°	52441 \angle -11,23°	62783 \angle 13,26°	63010 \angle 13,30°
		B	52303 \angle -131,28°	52441 \angle -131,23°	62837 \angle -106,73°	63010 \angle -106,70°
		C	52315 \angle 108,73°	52441 \angle 108,77°	62819 \angle 133,22°	63010 \angle 133,30°
	Corrente pós-falta (A)	A	1527,9 \angle 115,69°	1531,7 \angle 115,73°	2168,5 \angle 139,95°	2174,3 \angle 139,98°
		B	1528,1 \angle -4,32°	1531,7 \angle -4,27°	2168,8 \angle 19,94°	2174,3 \angle 19,98°
		C	1527,6 \angle -124,32°	1531,7 \angle -124,27°	2168,5 \angle -100,06°	2174,3 \angle -100,02°

Na tabela 4.6 não foram mostrados os fasores de tensão e corrente pré-falta para a falta trifásica por serem iguais aos fasores de tensão e corrente pré-falta para a falta fase A-terra.

As diferenças entre os fasores de tensão e corrente, pré-falta e pós-falta, obtidos pelo método de localização de faltas e gerados pelo ATP ocorreram por causa do estágio de filtragem analógica, onde foi utilizado um circuito de filtro analógico

utilizando componentes passivos: resistores, capacitores e indutores ao invés de ser utilizado um bloco de função de transferência ideal.

As figuras 4.3 e 4.4 mostram as tensões e correntes, pré-falta e pós-falta, medidas no terminal local para uma falta fase A-terra com resistência de 5Ω a 50 km do terminal local, no trecho 2.

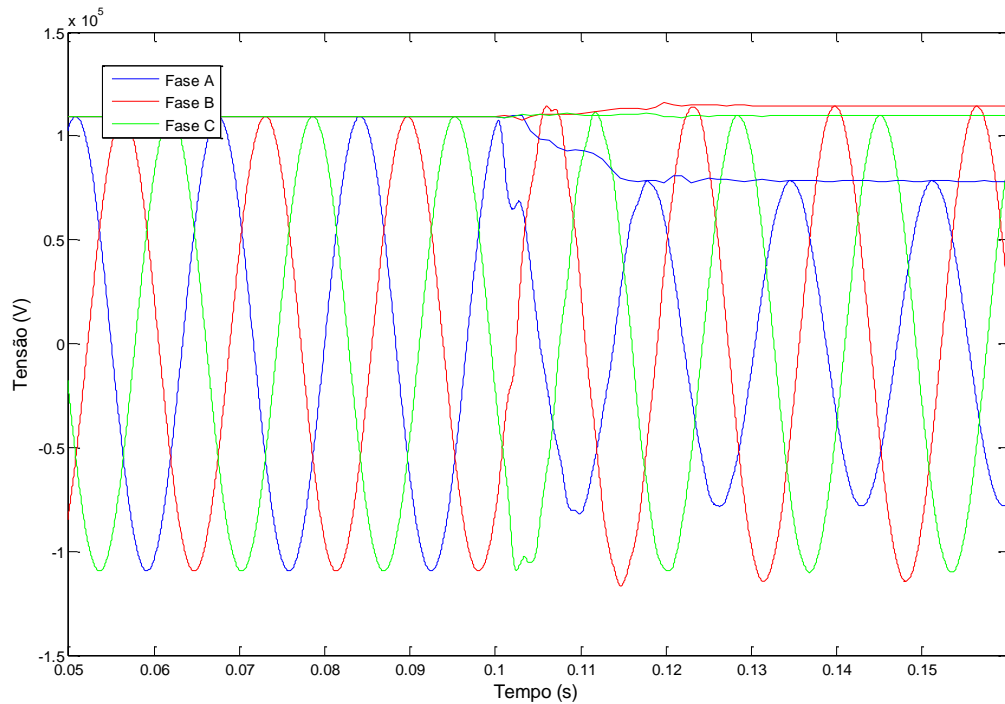


Figura 4.3 – Tensões no terminal local para falta fase A-terra

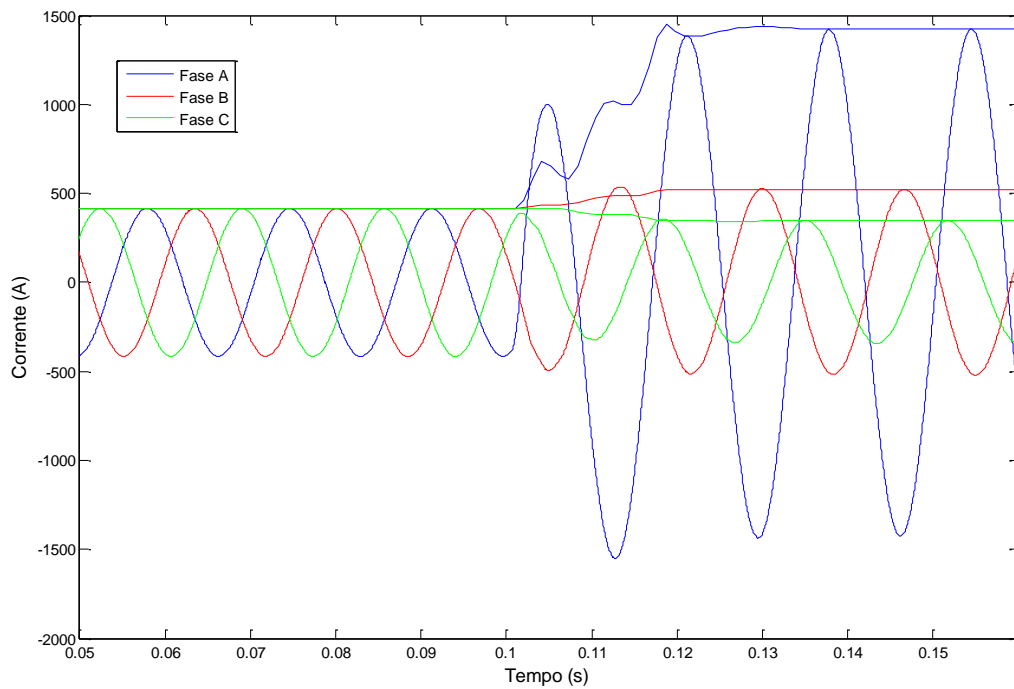


Figura 4.4 – Correntes no terminal local para falta fase A-terra

As figuras 4.5 e 4.6 mostram as tensões e correntes, pré-falta e pós-falta, medidas no terminal remoto para uma falta fase A-terra com resistência de 5Ω a 50 km do terminal local, no trecho 2.

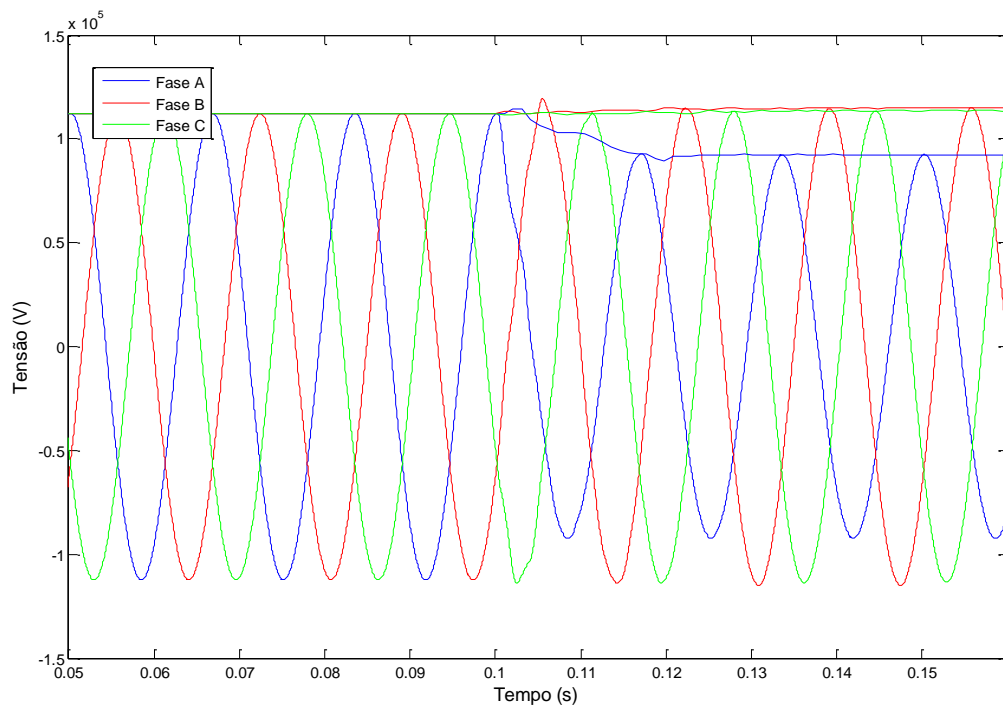


Figura 4.5 – Tensões no terminal remoto para falta fase A-terra

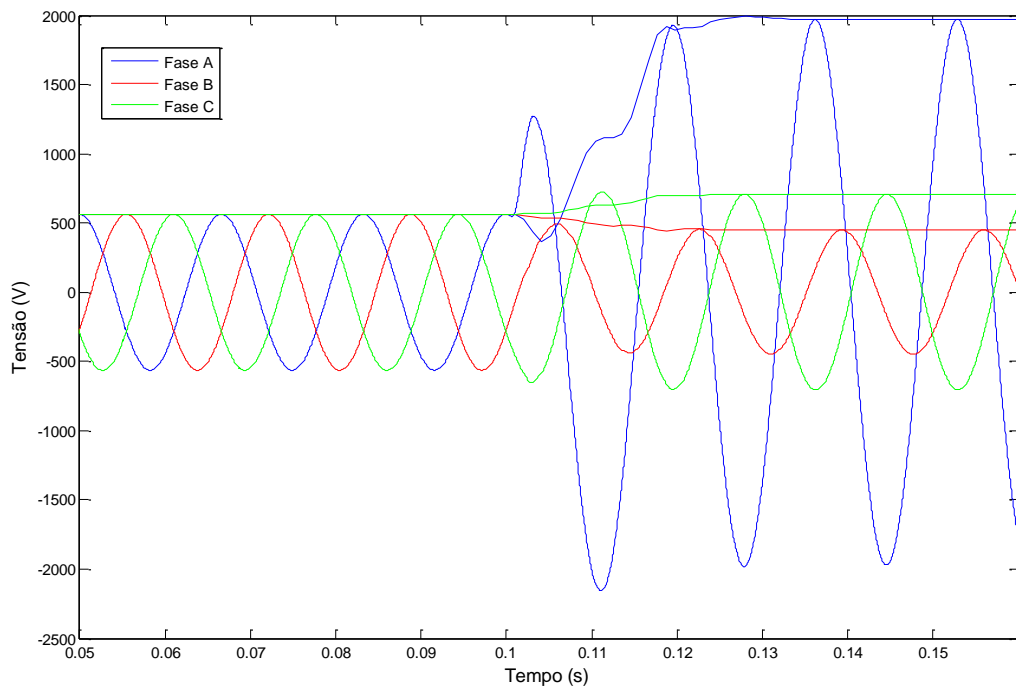


Figura 4.6 – Correntes no terminal remoto para falta fase A-terra

As figuras 4.7 e 4.8 mostram as tensões e correntes, pré-falta e pós-falta, medidas no terminal local para uma falta trifásica com resistência de 5Ω a 50 km do terminal local, no trecho 2.

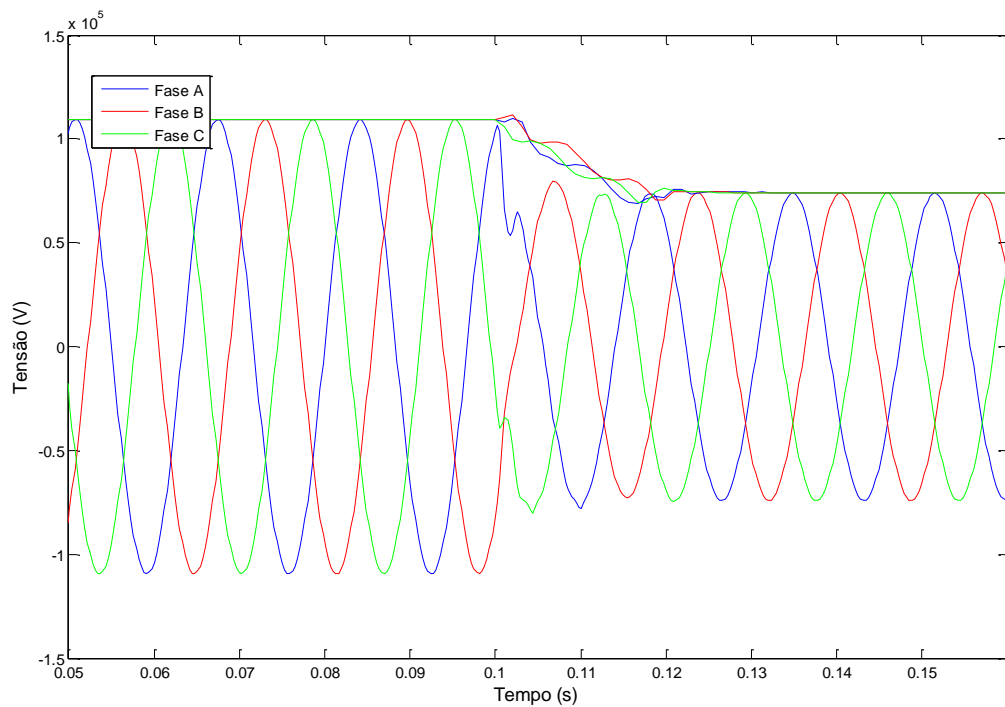


Figura 4.7 – Tensões no terminal local para falta trifásica

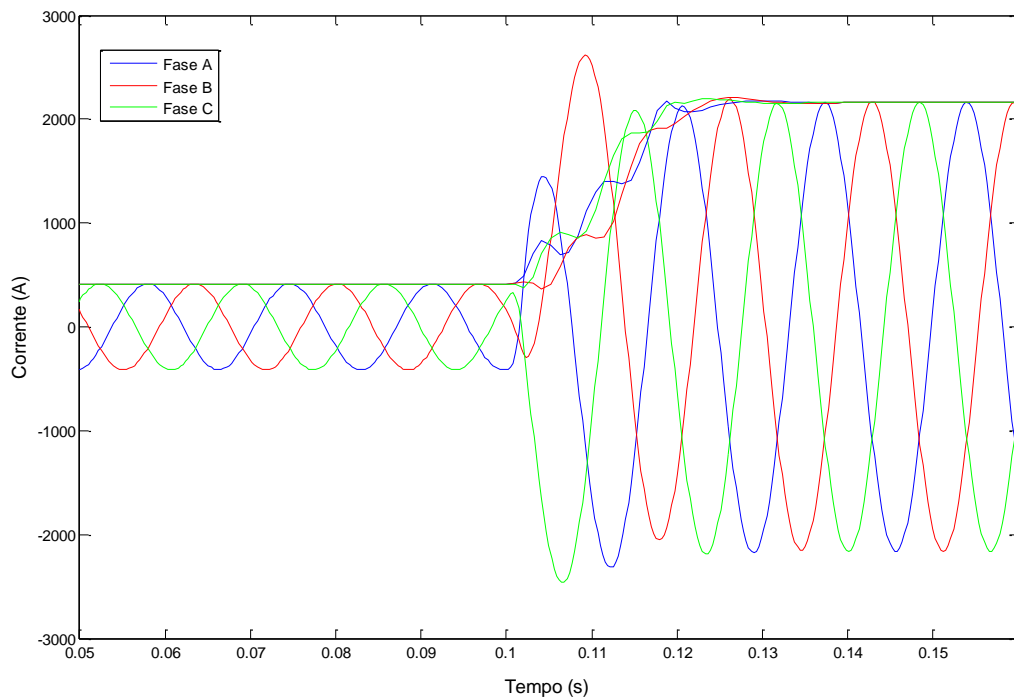


Figura 4.8 – Correntes no terminal local para falta trifásica

As figuras 4.9 e 4.10 mostram as tensões e correntes, pré-falta e pós-falta, medidas no terminal remoto para uma falta trifásica com resistência de 5Ω a 50 km do terminal local, no trecho 2.

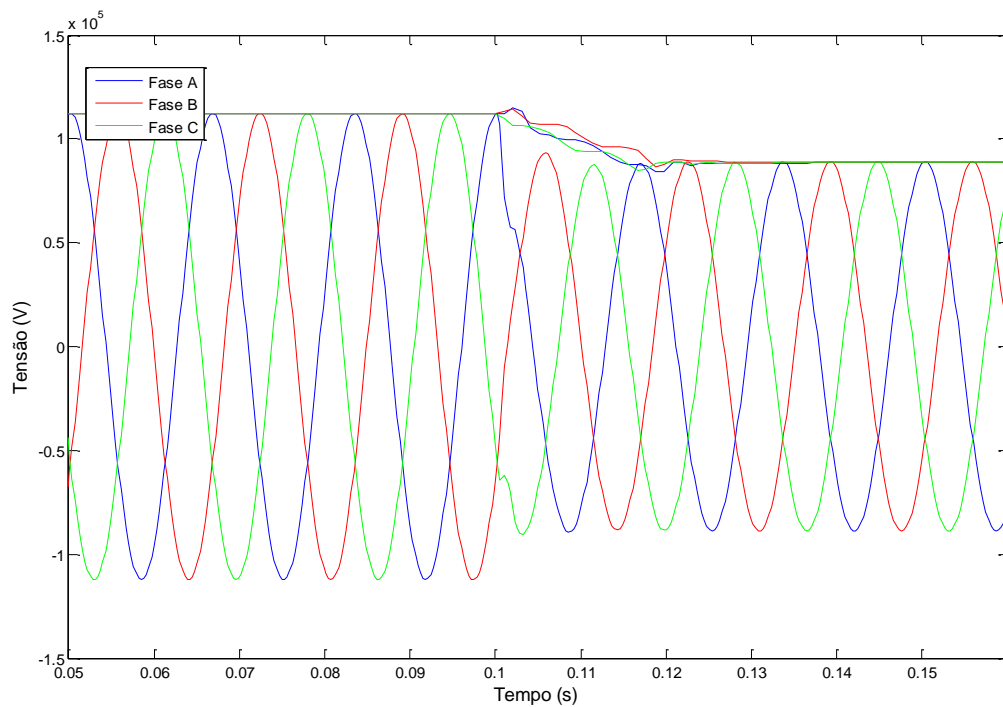


Figura 4.9 – Tensões no terminal remoto para falta trifásica

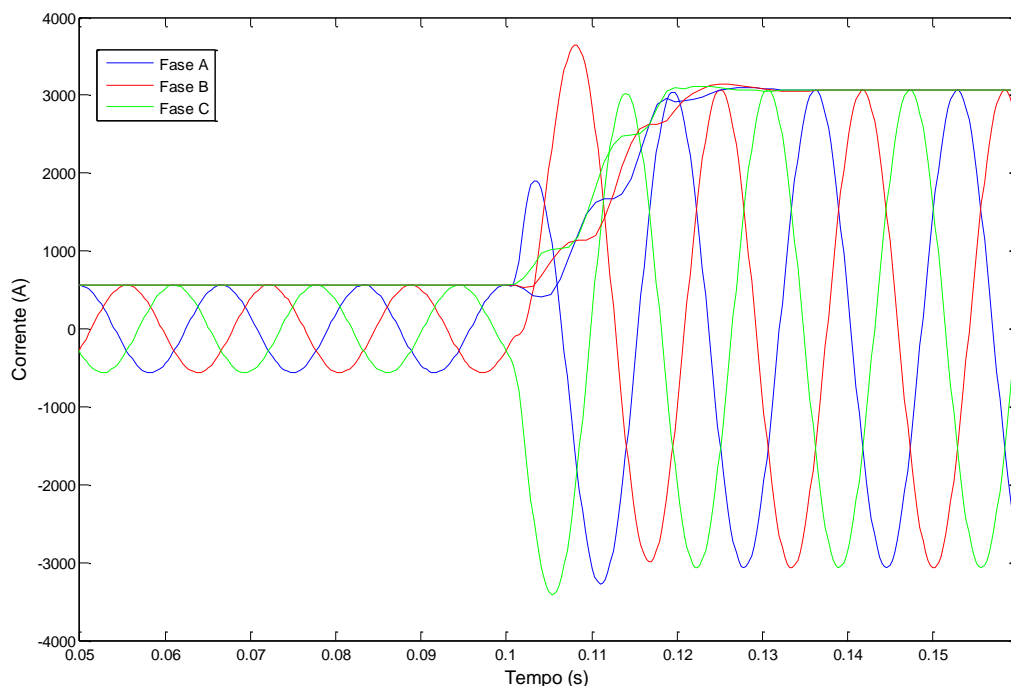


Figura 4.10 – Correntes no terminal remoto para falta trifásica

4.2.2 Avaliação do algoritmo de estimativa de cargas

A seguir estão apresentados os resultados da simulação para:

- **Falta fase-terra (AN) e falta trifásica, ambas com resistência de falta de 5Ω a 50 km do terminal local, no trecho 2;**
- **Erros nos fasores de tensão e corrente devido ao filtro analógico.**

Tabela 4.7 – Cargas estimadas para faltas fase-terra (AN) e trifásica a 50 km do terminal local, no trecho 2

Falta	Carga	Impedâncias de carga simuladas (Ω)	Impedâncias de cargas calculadas (Ω)	Erro (Ω)
Fase-terra(AN)	1	15,235+j11,425	15,315 +j11,357	0,080-j0,068
	2	25,030+j10,660	23,852+j10,900	-1,178+j0,240
	3	22,790+j7,487	22,219+j7,894	-0,571+ j0,407
	4	13,5+j6,536	14,185+j6,386	0,685-j0,150

Continua

Falta	Carga	Impedâncias de carga simuladas (Ω)	Impedâncias de cargas calculadas (Ω)	Erro (Ω)
Trifásica	1	15,235+j11,425	15,250+j11,398	0,015-j0,027
	2	25,030+j10,660	23,876+j10,945	-1,154+j0,285
	3	22,790+j7,487	22,222+j7,964	-0,568+j0,477
	4	13,5+j6,536	14,208+j6,316	0,708-j0,220

- **Falta fase-terra (AN) e falta trifásica, ambas com resistência de falta de 5 Ω a 35 km do início da derivação 2, no trecho 4;**
- **Erros nos fasores de tensão e corrente devido ao filtro analógico.**

Tabela 4.8 – Cargas estimadas para faltas fase-terra (AN) e trifásica a 35 km do início da derivação 2, no trecho 4

Falta	Carga	Impedâncias de carga simuladas (Ω)	Impedâncias de cargas calculadas (Ω)	Erro (Ω)
Fase-terra(AN)	1	15,235+j11,425	15,250+j11,398	0,015-j0,027
	2	25,030+j10,660	23,556+j10,914	-1,474+j0,254
	3	22,790+j7,487	22,021+j7,970	-0,769+j0,483
	4	13,5+j6,536	14,430+j6,367	0,930-j0,169
Trifásica	1	15,235+j11,425	15,202+j11,423	-0,033-j0,002
	2	25,030+j10,660	23,765+j10,932	-1,265+j0,272
	3	22,790+j7,487	22,143+j7,961	-0,647+j0,474
	4	13,5+j6,536	14,304+j6,326	0,804-j0,210

- **Falta fase-terra (AN) e falta trifásica, ambas com resistência de falta de 5 Ω a 50 km do início da derivação 1, no trecho 6;**
- **Erros nos fasores de tensão e corrente devido ao filtro analógico.**

Tabela 4.9 – Cargas estimadas para faltas fase-terra (AN) e trifásica a 50 km do início da derivação 1, no trecho 6

Falta	Carga	Impedâncias de carga simuladas (Ω)	Impedâncias de cargas calculadas (Ω)	Erro (Ω)
Fase-terra(AN)	1	15,235+j11,425	15,250+j11,398	0,015-j0,027
	2	25,030+j10,660	24,338+j11,004	-0,692+j0,344
	3	22,790+j7,487	22,632+j7,942	-0,158+j0,455
	4	13,5+j6,536	13,852+j6,224	0,352-j0,312
Falta trifásica	1	15,235+j11,425	15,250+j11,398	0,015-j0,027
	2	25,030+j10,660	23,691+j10,916	-1,339+j0,256
	3	22,790+j7,487	22,096+j7,948	-0,694+j0,461
	4	13,5+j6,536	14,336+j6,361	0,836-j0,175

4.2.3 Avaliação do algoritmo de localização de faltas

Os itens 4.2.3.1, 4.2.3.2, 4.2.3.3 e 4.2.3.4 apresentam os resultados da simulação para a avaliação do algoritmo de localização de falta proposto frente à variações da distância de falta, à variações do tipo de falta, à variações da resistência de falta e frente à erros nos fasores de tensão e corrente, pré-falta e pós-falta, e erros nos parâmetros da linha. No item 4.2.3.5 são apresentados comentários sobre os resultados obtidos nos itens 4.2.3.1, 4.2.3.2, 4.2.3.3 e 4.2.3.4.

4.2.3.1 Resultados para variação da distância de falta

Neste item estão apresentados os resultados da análise de desempenho do algoritmo proposto para a variação da distância de falta, conforme as seguintes definições:

As distâncias de falta dos trechos 1, 2 e 3 são medidas em relação ao terminal local, a distância de falta do trecho 4 é medida em relação ao início da derivação 2 (d_2) e as distâncias de falta dos trechos 5, 6 e 7 são medidas em relação à derivação 1 (d_1), conforme figura 4.1.

Os erros relativos obtidos para os trechos 1, 2 e 3 foram calculados em relação ao comprimento da linha principal, ou seja, 100 km, para o trecho 4 foram calculados em relação ao comprimento da derivação 2 (d_2), ou seja, 70 km e para os trechos 5, 6 e 7 foram calculados em relação ao comprimento da derivação 1 (d_1), ou seja, 110 km.

A seguir estão apresentados os resultados da simulação para:

- **Falta Fase A – terra;**
- **Resistência de falta igual a 5 Ω ;**
- **Erros nos fasores de tensão e corrente devido ao filtro analógico;**
- **Cargas e equivalentes estimados.**

Tabela 4.10 – Resultados para a variação da distância de falta para faltas fase A-terra

Trecho	Comprimento (km)	Distância de falta simulada (km)	Distância de falta calculada (km)	Erro absoluto (m)	Erro relativo (%)	R_{falta} calculada (Ω)
1	30	5	5,00	0	0	5,00
		15	15,00	0	0	5,00
		25	24,96	40	-0,040	4,99
2	40	35	35,02	20	0,020	5,00
		50	50,04	40	0,040	4,98
		60	59,96	40	-0,040	4,99

Continua

Trecho	Comprimento (km)	Distância de falta simulada (km)	Distância de falta calculada (km)	Erro absoluto (m)	Erro relativo (%)	R_{falta} calculada (Ω)
3	30	75	75,00	0	0	5,00
		85	85,00	0	0	5,00
		95	95,00	0	0	5,00
4	70	10	9,98	20	-0,029	5,01
		35	34,98	20	-0,029	5,01
		60	59,97	30	-0,043	4,99
5	30	5	4,99	10	-0,009	4,99
		15	14,99	10	-0,009	5,00
		25	25,00	0	0	5,02
6	40	35	34,95	50	-0,046	5,02
		50	49,96	40	-0,036	5,05
		60	59,95	50	-0,046	4,99
7	40	75	75,07	70	0,064	5,03
		90	89,95	50	-0,046	5,10
		100	99,97	30	-0,027	5,04

Pode-se observar na tabela 4.10 que para faltas fase-terra na linha principal o erro aumenta a medida que a falta se afasta de um dos terminais, local ou remoto. Para faltas fase-terra na derivação 2, a medida que a falta se afasta do ponto de derivação (d_2) o erro cresce. Para faltas fase-terra na derivação 1 o erro é maior próximo às cargas conectadas entre dois trechos da mesma.

Os resultados para as faltas nos pontos de derivação, d_1 e d_2 , estão dispostos na tabela 4.11, onde os campos: Distância de falta simulada e Distância de falta calculada contêm as distâncias com referência ao início dos trechos envolvidos, ao contrário dos campos: Distância de falta simulada e Distância de falta calculada da tabela 4.10, cujas referências se encontram descritas no começo deste item. O campo contendo os erros relativos continua com as mesmas referências definidas para a tabela 4.10.

Tabela 4.11 – Resultados para falta fase A – terra nos pontos de derivação d_1 e d_2

Ponto de derivação	Trechos envolvidos	Distância de falta simulada (km)	Distância de falta calculada (km)	Erro absoluto (m)	Erro relativo (%)	R_{falta} calculada (Ω)
d_1	1	30	30,00	0	0	5,02
	2	0	0	0	0	5,01
	5	0	0	0	0	5,01
d_2	2	40	40,00	0	0	4,99
	3	0	0	0	0	5,00
	4	0	0	0	0	5,00

Como mostra a tabela 4.11, qualquer um dos trechos envolvidos na falta pode ser utilizado como resultado, mas como o algoritmo retorna uma saída, ele irá escolher o resultado que contiver o menor erro (erro calculado pela função objetivo), ou seja, o trecho, dentre os trechos envolvidos, que apresentar o menor erro será apresentado como resultado pelo algoritmo.

- **Falta Fases BC – terra;**
- **Resistência de falta igual a 5 Ω ;**
- **Erros nos fasores de tensão e corrente devido ao filtro analógico;**
- **Cargas e equivalentes estimados.**

Tabela 4.12 – Resultados para a variação da distância de falta para faltas fases BC-terra

Trecho	Comprimento (km)	Distância de falta simulada (km)	Distância de falta calculada (km)	Erro absoluto (m)	Erro relativo (%)	R_{falta} calculada (Ω)
1	30	5	5,00	0	0	5,00
		15	15,00	0	0	5,00
		25	25,01	10	0,010	5,00
2	40	35	34,98	20	-0,020	4,99
		50	50,01	10	0,010	4,99
		60	59,99	10	-0,010	4,99
3	30	75	75,00	0	0	5,00
		85	85,00	0	0	5,00
		95	95,00	0	0	5,00

Continua

Trecho	Comprimento (km)	Distância de falta simulada (km)	Distância de falta calculada (km)	Erro absoluto (m)	Erro relativo (%)	R _{falta} calculada (Ω)
4	70	10	10,00	0	0	5,00
		35	35,01	10	0,014	5,00
		60	60,02	20	0,029	5,01
5	30	5	4,99	10	-0,009	5,01
		15	15,00	0	0	5,00
		25	25,01	10	0,009	4,99
6	40	35	35,04	40	0,036	5,00
		50	50,02	20	0,018	4,97
		60	59,98	20	-0,018	5,02
7	40	75	75,04	40	0,036	5,00
		90	90,07	70	0,064	4,99
		100	100,09	90	0,082	4,99

Os resultados para as faltas nos pontos de derivação, d_1 e d_2 , estão dispostos na tabela 4.13, onde os campos: Distância de falta simulada e Distância de falta calculada contêm as distâncias com referência ao início dos trechos envolvidos, ao contrário dos campos: Distância de falta simulada e Distância de falta calculada da tabela 4.12, cujas referências se encontram descritas no começo deste item. O campo contendo os erros relativos continua com as mesmas referências definidas para a tabela 4.12.

Tabela 4.13 – Resultados para falta fases BC – terra nos pontos de derivação d_1 e d_2

Ponto de derivação	Trechos envolvidos	Distância de falta simulada (km)	Distância de falta calculada (km)	Erro absoluto (m)	Erro relativo (%)	R _{falta} calculada (Ω)
d_1	1	30	30,00	0	0	5,00
	2	0	0,01	10	0,01	5,00
	5	0	0	0	0	5,00
d_2	2	40	40,00	0	0	5,00
	3	0	0	0	0	5,00
	4	0	0	0	0	5,00

Como mostra a tabela 4.13, qualquer um dos trechos envolvidos na falta pode ser utilizado como resultado, mas como o algoritmo retorna uma saída, ele irá escolher o resultado que contiver o menor erro (erro calculado pela função objetivo), ou seja, o trecho, dentre os trechos envolvidos, que apresentar o menor erro será apresentado como resultado pelo algoritmo.

- **Falta Fases BC;**
- **Resistência de falta igual a 5 Ω ;**
- **Erros nos fasores de tensão e corrente devido ao filtro analógico;**
- **Cargas e equivalentes estimados.**

Tabela 4.14 – Resultados para a variação da distância de falta para faltas fases BC

Trecho	Comprimento (km)	Distância de falta simulada (km)	Distância de falta calculada (km)	Erro absoluto (m)	Erro relativo (%)	R _{falta} calculada (Ω)
1	30	5	5,00	0	0	5,00
		15	15,01	10	0,010	4,99
		25	25,01	10	0,010	4,98
2	40	35	35,01	10	0,010	4,99
		50	50,00	0	0	5,00
		60	59,99	10	-0,010	4,99
3	30	75	75,00	0	0	4,99
		85	85,00	0	0	5,00
		95	95,00	0	0	5,00
4	70	10	10,01	10	0,014	4,99
		35	35,02	20	0,029	4,98
		60	60,04	40	0,057	4,98
5	30	5	5,01	10	0,009	4,99
		15	15,00	0	0	4,98
		25	25,01	10	0,009	4,98
6	40	35	35,02	20	0,018	4,98
		50	50,03	30	0,027	4,97
		60	60,04	40	0,036	4,96

Continua

Trecho	Comprimento (km)	Distância de falta simulada (km)	Distância de falta calculada (km)	Erro absoluto (m)	Erro relativo (%)	R_{falta} calculada (Ω)
7	40	75	75,05	50	0,045	4,97
		90	90,19	190	0,173	4,85
		100	100,27	270	0,246	4,87

Os resultados para as faltas nos pontos de derivação, d_1 e d_2 , estão dispostos na tabela 4.15, onde os campos: Distância de falta simulada e Distância de falta calculada contêm as distâncias com referência ao início dos trechos envolvidos, ao contrário dos campos: Distância de falta simulada e Distância de falta calculada da tabela 4.14, cujas referências se encontram descritas no começo deste item. O campo contendo os erros relativos continua com as mesmas referências definidas para a tabela 4.14.

Tabela 4.15 – Resultados para falta fases BC nos pontos de derivação d_1 e d_2

Ponto de derivação	Trechos envolvidos	Distância de falta simulada (km)	Distância de falta calculada (km)	Erro absoluto (m)	Erro relativo (%)	R_{falta} calculada (Ω)
d_1	1	30	30,00	0	0	4,99
	2	0	0,01	10	0,010	4,99
	5	0	0	0	0	4,99
d_2	2	40	40,00	0	0	4,99
	3	0	0	0	0	4,99
	4	0	0,01	10	0,014	4,99

Como mostra a tabela 4.15, qualquer um dos trechos envolvidos na falta pode ser utilizado como resultado, mas como o algoritmo retorna uma saída, ele irá escolher o resultado que contiver o menor erro (erro calculado pela função objetivo), ou seja, o trecho, dentre os trechos envolvidos, que apresentar o menor erro será apresentado como resultado pelo algoritmo.

- **Falta Fases ABC;**
- **Resistência de falta igual a 5 Ω ;**
- **Erros nos fasores de tensão e corrente devido ao filtro analógico;**
- **Cargas e equivalentes estimados.**

Tabela 4.16 – Resultados para a variação da distância de falta para faltas fases ABC

Trecho	Comprimento (km)	Distância de falta simulada (km)	Distância de falta calculada (km)	Erro absoluto (m)	Erro relativo (%)	R_{falta} calculada (Ω)
1	30	5	5,00	0	0	5,00
		15	15,00	0	0	5,00
		25	25,01	10	0,010	4,99
2	40	35	34,98	20	-0,020	5,00
		50	50,02	20	0,020	5,00
		60	59,98	20	-0,020	5,00
3	30	75	75,00	0	0	5,00
		85	85,00	0	0	5,00
		95	95,00	0	0	5,00
4	70	10	9,99	10	-0,014	5,00
		35	35,00	0	0	5,00
		60	59,99	10	-0,014	4,99
5	30	5	4,99	10	-0,009	5,00
		15	14,99	10	-0,009	5,00
		25	24,97	30	-0,027	5,01
6	40	35	34,98	20	-0,018	5,00
		50	50,06	60	0,055	5,00
		60	59,98	20	-0,018	5,01
7	40	75	74,96	40	-0,036	5,00
		90	90,04	40	0,036	4,98
		100	99,98	20	-0,018	5,00

Os resultados para as faltas nos pontos de derivação, d_1 e d_2 , estão dispostos na tabela 4.17, onde os campos: Distância de falta simulada e Distância de falta calculada contêm as distâncias com referência ao início dos trechos envolvidos, ao

contrário dos campos: Distância de falta simulada e Distância de falta calculada da tabela 4.16, cujas referências se encontram descritas no começo deste item. O campo contendo os erros relativos continua com as mesmas referências definidas para a tabela 4.16.

Tabela 4.17 – Resultados para falta fases ABC nos pontos de derivação d_1 e d_2

Ponto de derivação	Trechos envolvidos	Distância de falta simulada (km)	Distância de falta calculada (km)	Erro absoluto (m)	Erro relativo (%)	R_{falta} calculada (Ω)
d_1	1	30	29,99	10	-0,010	5,00
	2	0	0,01	10	0,010	4,99
	5	0	0	0	0	5,00
d_2	2	40	40,00	0	0	5,00
	3	0	0	0	0	5,00
	4	0	0	0	0	5,00

Como mostra a tabela 4.17, qualquer um dos trechos envolvidos na falta pode ser utilizado como resultado, mas como o algoritmo retorna uma saída, ele irá escolher o resultado que contiver o menor erro (erro calculado pela função objetivo), ou seja, o trecho, dentre os trechos envolvidos, que apresentar o menor erro será apresentado como resultado pelo algoritmo.

4.2.3.2 Resultados para variação do tipo de falta

Neste item estão apresentados os resultados da análise de desempenho do algoritmo proposto para a variação do tipo de falta ocorrido, conforme as seguintes definições:

Simulações de faltas fase A-terra, fases BC-terra, fases BC e trifásicas nos trechos 2, 4 e 6 pois contêm as distâncias médias da linha principal, da derivação 1 e da derivação 2, respectivamente.

A distância de falta do trecho 2 é medida em relação ao terminal local, a distância de falta do trecho 4 é medida em relação ao início da derivação 2 (d_2) e a distância de

falta do trecho 6 é medida em relação ao início da derivação 1 (d_1), conforme figura 4.1.

Os erros relativos obtidos para o trecho 2 foram calculados em relação ao comprimento da linha principal, ou seja, 100 km, para o trecho 4 foram calculados em relação ao comprimento da derivação 2 (d_2), ou seja, 70 km e para o trecho 6 foram calculados em relação ao comprimento da derivação 1 (d_1), ou seja, 110 km.

A seguir estão apresentados os resultados da simulação para:

- **Distância de falta igual a 50 km do início do terminal local – Trecho 2;**
- **Resistência de falta igual a 5 Ω ;**
- **Erros nos fasores de tensão e corrente devido ao filtro analógico;**
- **Cargas e equivalentes estimados.**

Tabela 4.18 – Resultados para a variação do tipo de falta para falta no trecho 2 a 50 km do terminal local

Tipo de falta	Distância de falta calculada (km)	Erro absoluto (m)	Erro relativo (%)	R_{falta} calculada (Ω)
AN	50,04	40	0,040	4,98
BN	50,02	20	0,020	4,99
CN	49,99	10	-0,010	4,99
ABN	49,99	10	-0,010	5,00
BCN	50,01	10	0,010	4,99
CAN	50,02	20	0,020	5,00
AB	50,04	40	0,040	4,98
BC	50,00	0	0	5,00
CA	50,03	30	0,030	5,00
ABC	50,02	20	0,020	5,00

- **Distância de falta igual a 35 km do início da derivação 2 – Trecho 4;**
- **Resistência de falta igual a 5 Ω ;**
- **Erros nos fasores de tensão e corrente devido ao filtro analógico;**
- **Cargas e equivalentes estimados.**

Tabela 4.19 – Resultados para a variação do tipo de falta para falta no trecho 4 a 35 km do início da derivação 2 (d_2)

Tipo de falta	Distância de falta calculada (km)	Erro absoluto (m)	Erro relativo (%)	R_{falta} calculada (Ω)
AN	34,98	20	-0,029	5,01
BN	35,05	50	0,071	4,97
CN	35,01	10	0,014	5,00
ABN	35,00	0	0	5,00
BCN	35,01	10	0,014	5,00
CAN	35,01	10	0,014	5,00
AB	35,00	0	0	5,00
BC	35,02	20	0,029	4,98
CA	35,02	20	0,029	4,99
ABC	35,00	0	0	5,00

- **Distância de falta igual a 50 km do início da derivação 1 – Trecho 6;**
- **Resistência de falta igual a 5 Ω ;**
- **Erros nos fasores de tensão e corrente devido ao filtro analógico;**
- **Cargas e equivalentes estimados.**

Tabela 4.20 – Resultados para a variação do tipo de falta para falta no trecho 6 a 50 km do início da derivação 1 (d_1)

Tipo de falta	Distância de falta calculada (km)	Erro absoluto (m)	Erro relativo (%)	R_{falta} calculada (Ω)
AN	49,96	40	-0,036	5,05
BN	50,14	140	0,127	4,93
CN	50,03	30	0,027	4,98

Continua

Tipo de falta	Distância de falta calculada (km)	Erro absoluto (m)	Erro relativo (%)	R_{falta} calculada (Ω)
ABN	49,98	20	-0,018	4,99
BCN	50,02	20	0,018	4,97
CAN	50,08	80	0,073	4,99
AB	49,96	40	-0,036	4,98
BC	50,03	30	0,027	4,97
CA	49,99	10	-0,009	5,05
ABC	50,06	60	0,055	5,00

4.2.3.3 Resultados para variação da resistência de falta

Neste item estão apresentados os resultados da análise de desempenho do algoritmo proposto para a variação da resistência de falta, conforme as seguintes definições:

Simulações de faltas fase A-terra, fases BC-terra, fases BC e trifásicas nos trechos 2, 4 e 6 pois contêm as distâncias médias da linha principal, da derivação 1 e da derivação 2, respectivamente.

A distância de falta do trecho 2 é medida em relação ao terminal local, a distância de falta do trecho 4 é medida em relação ao início da derivação 2 (d_2) e a distância de falta do trecho 6 é medida em relação ao início da derivação 1 (d_1), conforme figura 4.1.

Os erros relativos obtidos para o trecho 2 foram calculados em relação ao comprimento da linha principal, ou seja, 100 km, para o trecho 4 foram calculados em relação ao comprimento da derivação 2 (d_2), ou seja, 70 km e para o trecho 6 foram calculados em relação ao comprimento da derivação 1 (d_1), ou seja, 110 km.

- **Distância de falta igual a 50 km do início do terminal local – Trecho 2;**
- **Erros nos fasores de tensão e corrente devido ao filtro analógico;**
- **Cargas e equivalentes estimados.**

Tabela 4.21 – Resultados para a variação da resistência de falta para falta no trecho 2 a 50 km do terminal local

Tipo de falta	Resistência de falta	Distância de falta calculada (km)	Erro absoluto (m)	Erro relativo (%)	R_{falta} calculada (Ω)
Fase-terra	1	50,03	30	0,030	0,97
	5	50,04	40	0,040	4,98
	10	50,05	50	0,050	9,99
	20	50,06	60	0,060	19,99
Dupla-fase terra	1	49,98	20	-0,020	0,99
	5	50,01	10	0,010	4,99
	10	49,97	30	-0,030	10,01
	20	49,98	20	-0,020	20,00
Dupla-fase	1	50,01	10	0,010	0,98
	5	50,00	0	0	5,00
	10	50,00	0	0	10,00
	20	50,01	10	0,010	20,00
Trifásica	1	50,01	10	0,010	0,99
	5	50,02	20	0,020	5,00
	10	50,02	20	0,020	10,00
	20	50,02	20	0,020	20,00

- **Distância de falta igual a 35 km do início da derivação 2 – Trecho 4;**
- **Erros nos fasores de tensão e corrente devido ao filtro analógico;**
- **Cargas e equivalentes estimados.**

Tabela 4.22 – Resultados para a variação da resistência de falta para falta no trecho 4 a 35 km do início da derivação 1 (d_1)

Tipo de falta	Resistência de falta	Distância de falta calculada (km)	Erro absoluto (m)	Erro relativo (%)	R_{falta} calculada (Ω)
Fase-terra	1	34,98	20	-0,029	1,00
	5	34,98	20	-0,029	5,01
	10	34,99	10	-0,014	10,01
	20	34,92	80	-0,114	19,98
Dupla-fase terra	1	35,03	30	0,043	0,99
	5	35,01	10	0,014	5,00
	10	35,00	0	0	10,00
	20	35,01	10	0,014	20,00
Dupla-fase	1	35,03	30	0,043	0,97
	5	35,02	20	0,029	4,98
	10	35,01	10	0,014	9,99
	20	35,01	10	0,014	20,00
Trifásica	1	35,00	0	0	0,99
	5	35,00	0	0	5,00
	10	35,01	10	0,014	10,00
	20	35,01	10	0,014	20,00

- **Distância de falta igual a 50 km do início da derivação 1 – Trecho 6;**
- **Erros nos fasores de tensão e corrente devido ao filtro analógico;**
- **Cargas e equivalentes estimados.**

Tabela 4.23 – Resultados para a variação da resistência de falta para falta no trecho 6 a 50 km do início da derivação 2 (d_2)

Tipo de falta	Resistência de falta	Distância de falta calculada (km)	Erro absoluto (m)	Erro relativo (%)	R_{falta} calculada (Ω)
Fase-terra	1	49,97	30	-0,027	1,05
	5	49,96	40	-0,036	5,05
	10	49,95	50	-0,046	10,06
	20	50,01	10	0,009	20,00
Dupla-fase terra	1	50,09	90	0,082	0,93
	5	50,02	20	0,018	4,97
	10	50,02	20	0,018	10,00
	20	50,01	10	0,009	20,00
Dupla-fase	1	50,04	40	0,036	0,96
	5	50,03	30	0,027	4,97
	10	50,02	20	0,018	9,98
	20	50,02	20	0,018	20,00
Trifásica	1	49,97	30	-0,027	0,99
	5	50,06	60	0,055	5,00
	10	49,99	10	-0,009	10,00
	20	50,07	70	0,064	20,00

4.2.3.4 Resultados para variação nos fasores de tensão e corrente e variação dos parâmetros da linha

Neste item estão apresentados os resultados da análise de desempenho do algoritmo proposto para a variação do módulo dos fasores de tensão e corrente, pré-falta e pós-falta, e dos parâmetros da linha segundo uma distribuição de erros conforme mostra a figura 4.11.

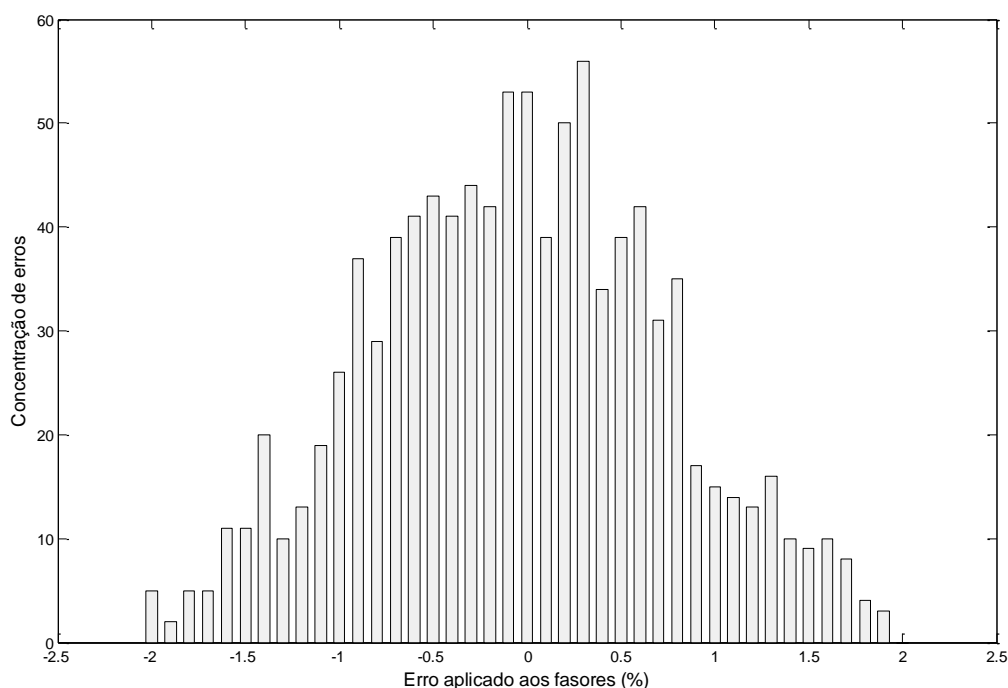


Figura 4.11 – Curva de densidade de probabilidades de erro

A curva de densidade de probabilidades de erro mostrada na figura 4.11 foi gerada pela função *randn* do programa MATLAB com 1000 pontos, possuindo média igual a zero e desvio padrão igual a 0,8, sendo que 99,2 (%) dos erros gerados estão entre -2 e 2 (%).

Além da definição dos erros que serão aplicados aos fasores e aos parâmetros da linha as seguintes definições foram utilizadas:

Simulações de faltas fase-terra (AN), dupla-fase-terra (BCN), dupla-fase (BC) e trifásicas nos trechos 2, 4 e 6 pois contêm as distâncias médias da linha principal, da derivação 1 e da derivação 2, respectivamente.

A distância de falta do trecho 2 é medida em relação ao terminal local, a distância de falta do trecho 4 é medida em relação ao início da derivação 2 (d_2) e a distância de falta do trecho 6 é medida em relação ao início da derivação 1 (d_1), conforme figura 4.1.

As tabelas 4.24, 4.25 e 4.26 apresentam:

- Distância de falta calculada pelo algoritmo sem erros gerados pela função *randn* do programa MATLAB nos fasores e nos parâmetros da linha;
- Erro absoluto máximo, erro absoluto mínimo, erro absoluto médio e desvio padrão da distância de falta com erros gerados pela função *randn* do programa MATLAB nos fasores;
- Erro absoluto máximo, erro absoluto mínimo, erro absoluto médio e desvio padrão da resistência de falta com erros gerados pela função *randn* do programa MATLAB nos fasores.

As tabelas 4.27, 4.28 e 4.29 apresentam:

- Distância de falta calculada pelo algoritmo sem erros gerados pela função *randn* do programa MATLAB nos fasores e nos parâmetros da linha;
- Erro absoluto máximo, erro absoluto mínimo, erro absoluto médio e desvio padrão da distância de falta com erros gerados pela função *randn* do programa MATLAB nos parâmetros da linha;
- Erro absoluto máximo, erro absoluto mínimo, erro absoluto médio e desvio padrão da resistência de falta com erros gerados pela função *randn* do programa MATLAB nos parâmetros da linha.

A seguir estão apresentados os resultados da simulação para erros na obtenção dos fasores, onde a coluna " D_{falta} sem erros", diz respeito às distâncias de falta calculadas sem erros gerados pela função *randn* do programa MATLAB nos fasores e nos parâmetros da linha:

- **Distância de falta igual a 50 km do início do terminal local – Trecho 2;**
- **Resistência de falta igual a 5 Ω ;**
- **Erros nos fasores de tensão e corrente devido ao filtro analógico;**
- **Cargas e equivalentes estimados.**

Tabela 4.24 – Resultados para erros nos fasores de tensão e corrente, pré-falta e pós-falta, para falta no trecho 2 a 50 km do terminal local

Tipo de falta	D_{falta} sem erros (km)	ϵ_{dist} máx. (m)	ϵ_{dist} mín. (m)	ϵ_{dist} médio (m)	σ_{dist} (m)	ϵ_{res} máx. (Ω)	ϵ_{res} mín. (Ω)	ϵ_{res} médio (Ω)	σ_{res} (Ω)
Fase-terra	50,04	2156,0	27,4	562,2	454,0	0,32	0	0,09	0,08
Dupla-fase-terra	50,01	963,3	15,4	360,1	261,0	0,17	0	0,04	0,04
Dupla-fase	50,00	1161,3	32,7	389,3	279,2	0,22	0	0,07	0,06
Trifásica	50,02	624,6	6,3	250,4	181,9	0,06	0	0,02	0,02

O histograma da figura 4.12 mostra a concentração percentual das simulações para os erros absolutos das distâncias de falta calculadas pelo algoritmo considerando erros nos fasores de tensão e corrente, pré-falta e pós-falta, para faltas no trecho 2.

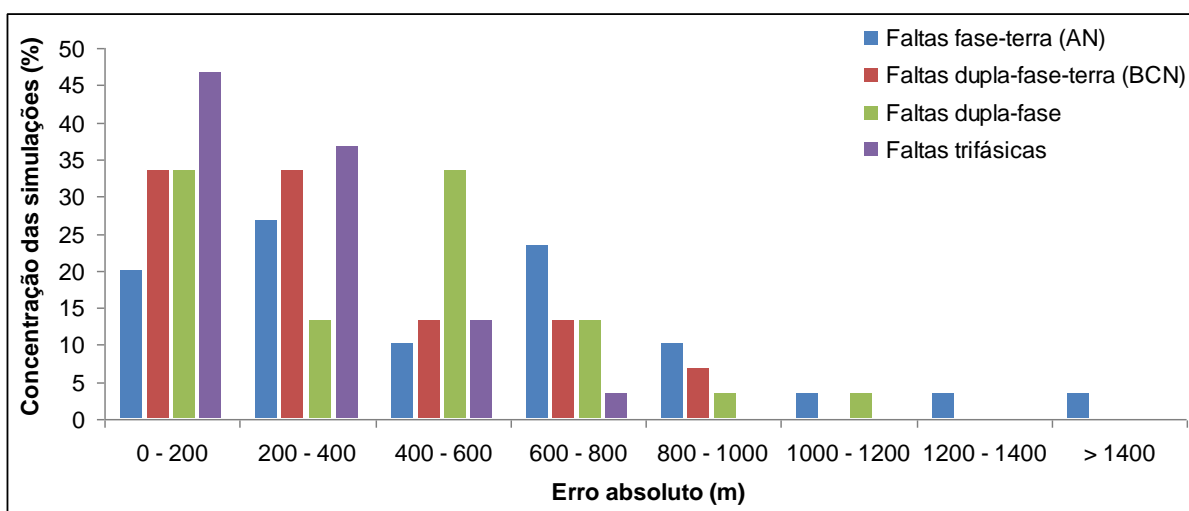


Figura 4.12 – Histograma dos erros absolutos das distâncias de falta para faltas no trecho 2, considerando erros nos fasores

- **Distância de falta igual a 35 km do início da derivação 2 – Trecho 4;**
- **Resistência de falta igual a 5 Ω ;**
- **Erros nos fasores de tensão e corrente devido ao filtro analógico;**
- **Cargas e equivalentes estimados.**

Tabela 4.25 – Resultados para erros nos fasores de tensão e corrente, pré-falta e pós-falta, para falta no trecho 4 a 35 km do início da derivação 2 (d_2)

Tipo de falta	D_{falta} sem erros (km)	ϵ_{dist} máx. (m)	ϵ_{dist} mín. (m)	ϵ_{dist} médio (m)	σ_{dist} (m)	ϵ_{res} máx. (Ω)	ϵ_{res} mín. (Ω)	ϵ_{res} médio (Ω)	σ_{res} (Ω)
Fase-terra	34,98	4016,4	85,5	1242,2	1059,2	0,60	0,01	0,22	0,14
Dupla-fase-terra	35,01	1292,6	113,5	633,3	328,6	0,47	0	0,14	0,13
Dupla-fase	35,02	2675,0	16,9	736,7	710,6	0,77	0	0,24	0,21
Trifásica	35,00	1408,0	58,4	555,8	383,9	0,44	0	0,12	0,11

O histograma da figura 4.13 mostra a concentração percentual das simulações para os erros absolutos das distâncias de falta calculadas pelo algoritmo considerando erros nos fasores de tensão e corrente, pré-falta e pós-falta, para faltas no trecho 4.

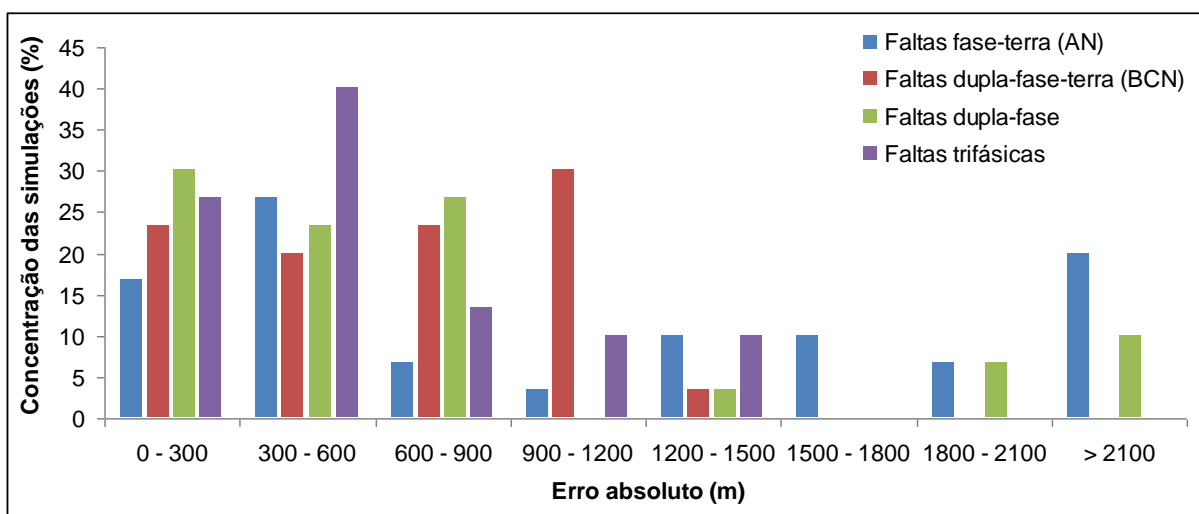


Figura 4.13 – Histograma dos erros absolutos das distâncias de falta para faltas no trecho 4, considerando erros nos fasores

- **Distância de falta igual a 50 km do início da derivação 1 – Trecho 6;**
- **Resistência de falta igual a 5 Ω ;**
- **Erros nos fasores de tensão e corrente devido ao filtro analógico;**
- **Cargas e equivalentes estimados.**

Tabela 4.26 – Resultados para erros nos fasores de tensão e corrente, pré-falta e pós-falta, para falta no trecho 6 a 50 km do início da derivação 1 (d_1)

Tipo de falta	D_{falta} sem erros (km)	ϵ_{dist} máx. (m)	ϵ_{dist} mín. (m)	ϵ_{dist} médio (m)	σ_{dist} (m)	ϵ_{res} máx. (Ω)	ϵ_{res} mín. (Ω)	ϵ_{res} médio (Ω)	σ_{res} (Ω)
Fase-terra	49,96	4024,6	129,0	1098,9	964,2	1,14	0,01	0,34	0,26
Dupla-fase-terra	50,02	1718,3	26,9	626,5	401,3	0,43	0,01	0,16	0,12
Dupla-fase	50,03	3286,1	9,7	698,6	653,1	0,74	0,03	0,29	0,18
Trifásica	50,06	1355,3	58,3	421,5	352,2	0,32	0,01	0,12	0,08

O histograma da figura 4.14 mostra a concentração percentual das simulações para os erros absolutos das distâncias de falta calculadas pelo algoritmo considerando erros nos fasores de tensão e corrente, pré-falta e pós-falta, para faltas no trecho 6.

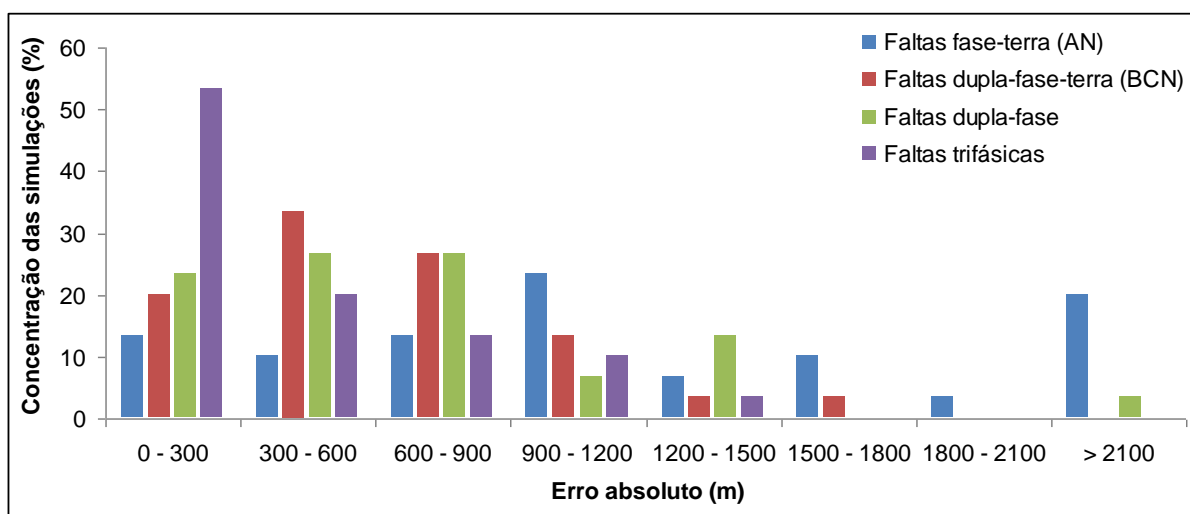


Figura 4.14 – Histograma dos erros absolutos das distâncias de falta para faltas no trecho 6, considerando erros nos fasores

A seguir estão apresentados os resultados da simulação para erros nos parâmetros da linha, onde a coluna " D_{falta} sem erros", diz respeito às distâncias de falta calculadas sem erros gerados pela função *randn* do programa MATLAB nos fasores e nos parâmetros da linha:

- **Distância de falta igual a 50 km do início do terminal local – Trecho 2;**
- **Resistência de falta igual a 5 Ω ;**
- **Erros nos fasores de tensão e corrente devido ao filtro analógico;**
- **Cargas e equivalentes estimados.**

Tabela 4.27 – Resultados para erros nos parâmetros da linha, para falta no trecho 2 a 50 km do terminal local

Tipo de falta	D_{falta} sem erros (km)	$\varepsilon_{\text{dist}}$ máx. (m)	$\varepsilon_{\text{dist}}$ mín. (m)	$\varepsilon_{\text{dist}}$ médio (m)	σ_{dist} (m)	ε_{res} máx. (Ω)	ε_{res} mín. (Ω)	ε_{res} médio (Ω)	σ_{res} (Ω)
Fase-terra	50,04	432,8	0,3	145,3	116,4	0,13	0	0,04	0,03
Dupla-fase-terra	50,01	85,5	0,7	31,8	22,8	0,10	0	0,04	0,03
Dupla-fase	50,00	200,2	1,5	77,3	55,1	0,14	0	0,05	0,04
Trifásica	50,02	142,0	4,5	51,9	38,6	0,07	0	0,03	0,02

O histograma da figura 4.15 mostra a concentração percentual das simulações para os erros absolutos das distâncias de falta calculadas pelo algoritmo considerando erros nos parâmetros da linha, para faltas no trecho 2.

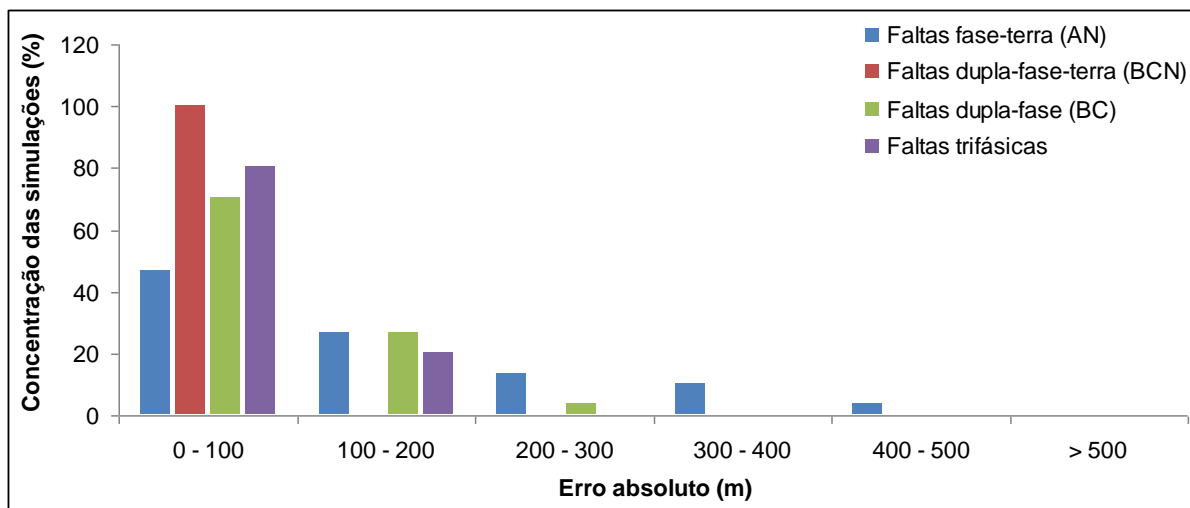


Figura 4.15 – Histograma dos erros absolutos das distâncias de falta para faltas no trecho 2, considerando erros nos parâmetros da linha

- **Distância de falta igual a 35 km do início da derivação 2 – Trecho 4;**
- **Resistência de falta igual a 5 Ω ;**
- **Cargas estimadas;**
- **Equivalentes estimados.**

Tabela 4.28 – Resultados para erros nos parâmetros da linha, para falta no trecho 4 a 35 km do início da derivação 2 (d_2)

Tipo de falta	D_{falta} sem erros (km)	$\varepsilon_{\text{dist}}$ máx. (m)	$\varepsilon_{\text{dist}}$ mín. (m)	$\varepsilon_{\text{dist}}$ médio (m)	σ_{dist} (m)	ε_{res} máx. (Ω)	ε_{res} mín. (Ω)	ε_{res} médio (Ω)	σ_{res} (Ω)
Fase-terra	34,98	875,9	26,7	314,6	179,4	0,54	0,01	0,17	0,12
Dupla-fase-terra	35,01	1010,9	12,8	347,8	262,4	0,35	0	0,12	0,09
Dupla-fase	35,02	1203,8	1,2	335,6	359,9	0,72	0,01	0,27	0,20
Trifásica	35,00	1284,1	7,0	347,3	257,0	0,35	0,01	0,12	0,08

O histograma da figura 4.16 mostra a concentração percentual das simulações para os erros absolutos das distâncias de falta calculadas pelo algoritmo considerando erros nos parâmetros da linha, para faltas no trecho 4.

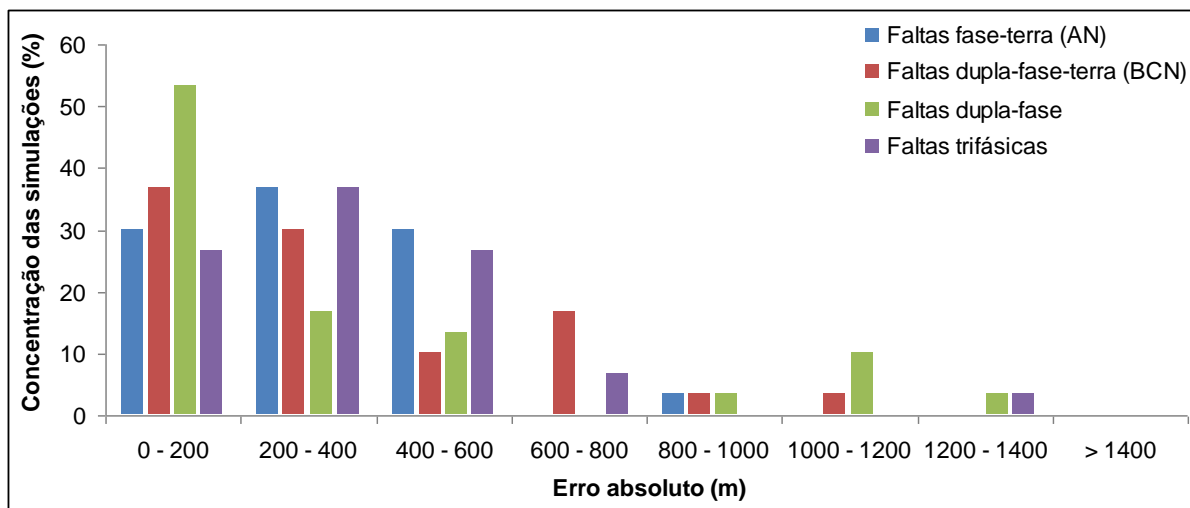


Figura 4.16 – Histograma dos erros absolutos das distâncias de falta para faltas no trecho 4, considerando erros nos parâmetros da linha

- **Distância de falta igual a 50 km do início da derivação 1 – Trecho 6;**
- **Resistência de falta igual a 5 Ω ;**
- **Erros nos fasores de tensão e corrente devido ao filtro analógico;**
- **Cargas e equivalentes estimados.**

Tabela 4.29 – Resultados para erros nos parâmetros da linha, para falta no trecho 6 a 50 km do início da derivação 1 (d_1)

Tipo de falta	D_{falta} sem erros (km)	ε_{dist} máx. (m)	ε_{dist} mín. (m)	ε_{dist} médio (m)	σ_{dist} (m)	ε_{res} máx. (Ω)	ε_{res} mín. (Ω)	ε_{res} médio (Ω)	σ_{res} (Ω)
Fase-terra	49,96	634,3	3,1	232,0	179,3	0,33	0,01	0,14	0,10
Dupla-fase-terra	50,02	1079,1	2,7	385,0	277,7	0,23	0	0,08	0,06
Dupla-fase	50,03	1115,8	11,9	426,0	298,6	0,51	0,01	0,18	0,13
Trifásica	50,06	1397,3	33,9	455,5	278,3	0,23	0,01	0,08	0,06

O histograma da figura 4.17 mostra a concentração percentual das simulações para os erros absolutos das distâncias de falta calculadas pelo algoritmo considerando erros nos parâmetros da linha, para faltas no trecho 6.

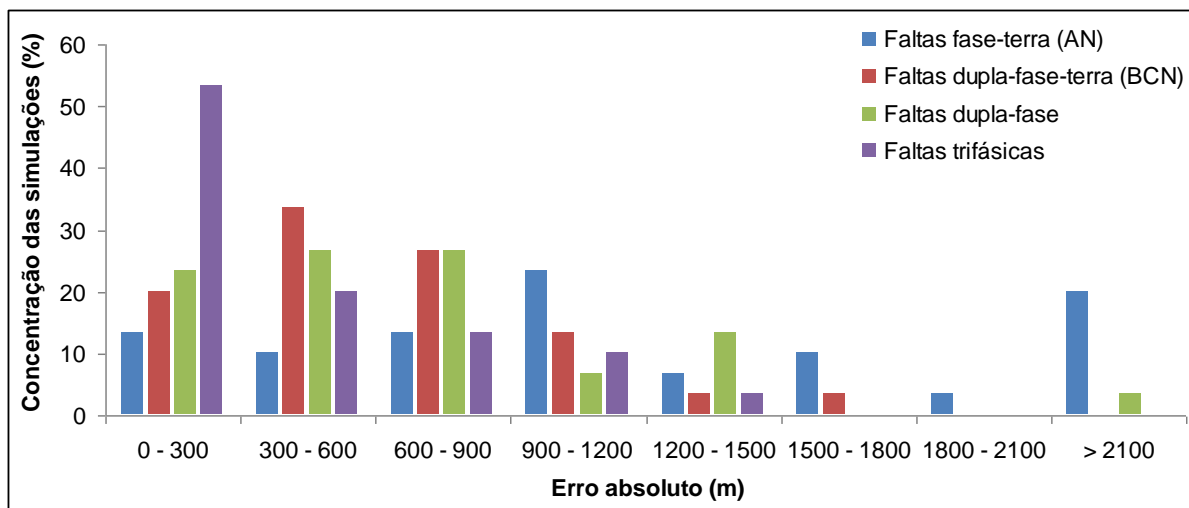


Figura 4.17 – Histograma dos erros absolutos das distâncias de falta para faltas no trecho 6, considerando erros nos parâmetros da linha

4.2.3.5 Comentários sobre os resultados

Os resultados obtidos nas simulações de variação da distância de falta apresentaram erros pequenos e com pouca variação se comparados aos comprimentos dos trechos da rede, onde para faltas fase-terra (AN) o erro absoluto médio foi de 24,76 m com desvio padrão de 21,36 m, para faltas dupla-fase-terra (BCN) o erro absoluto médio foi de 18,10 m com desvio padrão de 24,00 m, para faltas dupla-fase (BC) o erro absoluto médio foi de 34,76 m com desvio padrão de 67,72 m e para faltas trifásicas o erro absoluto médio foi de 16,19 m com desvio padrão de 15,96 m.

No caso de faltas no ponto de conexão das derivações com a linha principal, pontos d_1 e d_2 mostrados na figura 4.1, o algoritmo localizou exatamente o ponto da falta, para faltas fase-terra (AN), faltas dupla-fase-terra (BCN), dupla-fase (BC) e trifásica, como pode ser observado nas tabelas 4.11, 4.13, 4.15 e 4.17.

Para o caso de variação do tipo de falta, os resultados obtidos nas simulações apresentaram erros pequenos e com pouca variação se comparados aos comprimentos dos trechos da rede, onde para faltas ocorridas no trecho 2 o erro absoluto médio foi de 20,00 m com desvio padrão de 13,33 m, para trecho 4 o erro

absoluto médio foi de 14,00 m com desvio padrão de 15,06 m e para trecho o 6 o erro absoluto médio foi de 47,00 m com desvio padrão de 38,60 m.

Os resultados obtidos nas simulações de variação da resistência de falta apresentaram erros pequenos e com pouca variação se comparados aos comprimentos dos trechos da rede, onde para faltas ocorridas no trecho 2 o erro absoluto médio foi de 21,88 m com desvio padrão de 16,82 m, para trecho o 4 o erro absoluto médio foi de 16,88 m com desvio padrão de 19,22 m e para trecho o 6 o erro absoluto médio foi de 34,38 m com desvio padrão de 23,08 m.

Para o caso de erros nos fasores de tensão e corrente, pré-falta e pós-falta, apesar dos erros serem maiores em relação aos erros obtidos sem erros nos fasores e nos parâmetros, os erros obtidos nas simulações ainda são pequenos se comparados aos comprimentos dos trechos.

Os erros absolutos médios obtidos para faltas no trecho 2 se apresentaram menores que os erros absolutos médios obtidos para faltas nos trechos 4 e 6, onde, para estes trechos os erros absolutos médios foram parecidos, conforme pode se observar nas tabelas 4.24, 4.25 e 4.26.

Para o caso de erros nos parâmetros da linha, apesar dos erros serem maiores em relação aos erros obtidos sem erros nos fasores e nos parâmetros, os erros obtidos nas simulações ainda são pequenos se comparados aos comprimentos dos trechos.

Os erros absolutos médios obtidos para faltas no trecho 2 se apresentaram menores que os erros absolutos médios obtidos para faltas nos trechos 4 e 6, onde, para estes trechos os erros absolutos médios foram parecidos, conforme pode se observar nas tabelas 4.27, 4.28 e 4.29.

Os resultados obtidos pelas simulações mostram, então, que o algoritmo de localização de faltas proposto obtêm as informações de falta tais como, o local da falta (trecho da linha), a distância de falta e a resistência de falta com eficiência, apresentando erros pequenos, se comparados aos comprimentos dos trechos, mesmo com erros nos fasores e nos parâmetros, ressaltando que as cargas e os equivalentes são estimados e os transformadores estão ligados na configuração estrela-aterrada / delta, contribuindo, desta forma, com a corrente de falta de sequência zero.

5 CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho foi desenvolvido um método de localização de faltas em linhas com derivações com cargas conectadas ao longo ou ao final destas.

No desenvolvimento do método de localização faltas foi utilizado um processo de obtenção de fasores, onde foi desenvolvido um circuito de um filtro passa-baixas com componentes passivos para mitigar o erro de "aliasing" e um filtro digital baseado no método dos mínimos quadrados (MMQ) em série com um filtro digital passa-baixas de Butterwoth.

Os valores dos fasores de tensão e corrente pré-falta e pós-falta, obtidos pelo processo descrito anteriormente, ficaram próximos dos valores dos fasores calculados pelo ATP, como pode ser observado na tabela 4.6, sendo que a pequena divergência causada entre os valores dos fasores se deve ao fato da utilização de um circuito passivo ter sido utilizado como filtro ao invés de se utilizar uma função de transferência teórica ideal.

Foi desenvolvido neste trabalho um algoritmo de estimação das cargas, uma vez que muitas vezes não se dispõe das medições de tensão e corrente nos terminais das mesmas.

O algoritmo de estimação das cargas apresentou valores aceitáveis de impedância das cargas em relação aos valores simulados, tendo erro absoluto médio de $0,62 \Omega$ e desvio padrão de $0,46 \Omega$ na resistência e erro absoluto médio de $0,24 \Omega$ e desvio padrão de $0,16 \Omega$ na reatância, como pode ser observado nas tabelas 4.7, 4.8 e 4.9.

O algoritmo de localização de faltas proposto, além de ser o principal componente do método de localização de faltas, é a principal contribuição deste trabalho.

O método de localização de faltas foi submetido a vários testes para avaliar sua eficiência frente a diversas condições, tais como: variação da distância de falta, variação do tipo de falta, variação da resistência de falta e erros nos fasores e nos parâmetros da linha. Para realizar as avaliações de eficiência foi utilizada uma rede implementada no ATP, onde todos os transformadores foram utilizados na ligação estrela aterrada/ delta a fim de avaliar o método de localização de faltas frente à

contribuição da componente de sequência zero da corrente de falta que retorna pelo primário destes transformadores.

O método de localização de faltas se mostrou eficiente e robusto, na localização de faltas, em todos os casos de simulação descritos anteriormente, como mostram os resultados apresentados no capítulo 4 e os comentários apresentados no item 4.2.3.5.

Os maiores erros na localização de faltas ocorreram para erros nos fasores, sendo desta forma, de grande importância que o processo de obtenção dos mesmos seja eficiente. Além da precisão na obtenção dos fasores, para melhorar a precisão do método de localização de faltas é importante que os componentes da linha sejam modelados adequadamente.

O método desenvolvido neste trabalho abordou somente o caso de linhas com circuito simples e continuamente transpostas em todos os trechos, abrindo desta forma, espaço para estender o método para os casos de linhas com circuito duplo e linhas não-transpostas, tornando o método mais abrangente.

REFERÊNCIAS

BRAHMA, S. M.; GIRGIS A. A. **Fault location on a transmission line using synchronized voltage measurements.** IEEE Transactions on Power Delivery, v. 19, n. 4, p. 1619 - 1622, Oct. 2004.

CHO, J.; JUNG, C.; KIM, J. **Adaptive setting of digital relay for transmission line protection.** In: TENCON 2005. 2005 IEEE Region 10. Melbourne, Qld., Nov. 2005. p. 1 – 6.

EICHHORN, K. Fr.; LOBOS, T.; RUCZEWSK, P. **Constrained frequency domain algorithms for determination of parameters of fundamental sinewave of signals.** IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution, v. 140, n. 6, p. 477-480, Nov. 1993.

FAYBISOVICH, V.;KHOROSHEV, M. I. **Frequency domain double-ended method of fault location for transmission lines.** In: IEEE/PES. Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2008. T&D. Chicago, IL, 2008. p. 1-6.

FENG, D.; XIANGJUN, Z.; CHAO, Y.; XIAO'AN, Q.; ZHIHUA, W. **Novel traveling wave location algorithm for transmission network based on information fusion technology.** Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA), International Conference on. Hunan, 2008. p. 1091-1095.

FENG, Z.; JUN, L.; LI, Z.; ZHIHAO, Y. **A new fault location method avoiding wave speed and based on traveling waves for ehv transmission line.** In: DRPT 2008. Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, Third International Conference on. Nanjuing, 2008. p. 1753-1757.

FULCZYK, M. et al. **Two-end unsynchronized fault location algorithm for double-circuit series compensated lines.** In: IEEE. Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century. Pittsburgh, PA, 2008. p. 1-9.

GOPALAKRISHNAN, A.; KEZUNOVIC, M.; MCKENNA, S. M.; HAMAI, D. M. **Fault location using the distributed parameter transmission line model.** IEEE Transactions on Power Delivery, v. 15, n. 4, p. 1169-1174, Oct. 2000.

JIANG, J. A.; LIN, Y. H.; YANG, J. Z.; TOO, T. M.; LIU, C. W. **An adaptive PMU based fault detection/location technique for transmission lines, part II: PMU implementation and performance evaluation.** IEEE Transactions on Power Delivery, v. 15, n. 4, p. 1136–1146, Oct. 2000.

KAWADY, T.; STENZEL, J. **Investigation of practical problems for digital fault location algorithms based on EMTP simulation.** In: IEEE/PES. Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002: Asia Pacific. Yokohama, Japão. v. 1, p. 118-123. Oct. 2002.

LIANG, Y.; WANG, G.; LI, H. **A novel fault location for transmission line by the combination of particle swarm optimization and least squares method.** In: IPEC 2007. Power Engineering Conference, International. Singapore, 2007. p. 1151-1155.

LI, K. K.; LAI, L. L.; DAVID, A. K. **Stand alone intelligent digital distance relay.** IEEE Transactions on Power Delivery, v. 15, n. 1, p. 137-142, Feb. 2000.

LIAO, Y. **Fault location for single-circuit line based on bus-impedance matrix utilizing voltage measurements.** IEEE Transactions on Power Delivery, v. 23, n. 2, p. 609-617, April 2008.

LIAO, Y.; KEZUNOVIC, M. **Optimal estimate of transmission line fault location considering measurement errors.** IEEE Transactions on Power Delivery, v. 22, n. 3, p. 1335 - 1341, July 2007.

LIN, X. et al. **Study on fault location for high voltage overhead transmission lines based on neural network system.** In: ISAP 2007. Intelligent Systems Applications to Power Systems, International Conference on. Toki Messe, Niigata, 2007. p. 1-5.

LIU, C.; LIEN, K.; CHEN, C.; JIANG, J. **A universal fault location technique for n-terminal ($n \geq 3$) transmission lines.** IEEE Transactions on Power Delivery, v. 23, n. 3, p. 1366 - 1373, July 2008.

MANASSERO, G. **Sistema para localização de faltas em linhas de transmissão com subestações conectadas em derivação.** Tese (doutorado), São Paulo, EPUSP, 2006.

MATHWORKS. **MATLAB, High-performance numeric computation and visualization software: reference guide.** Imprensa Natick, Mass, 1992.

MUHAMMAD, K.; ROY, K. **On complexity reduction of FIR digital filters using constrained least squares solution.** In: ICCD 1997. Computer Design: VLSI in Computers and Processors. Proceedings., 1997 IEEE International Conference on. Austin, TX, 1997. p. 196-201.

OGATA, K. **Discrete-time control systems.** Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, 1995.

OLIVEIRA, C. C. B.; SCHMIDT, H. P.; KAGAN, N.; ROBBA, E. J. **Introdução a sistemas elétricos de potência – componentes simétricas.** 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2000.

PEREIRA, C.E.M. **Localizadores digitais de faltas em linhas de transmissão.** dissertação (mestrado), São Paulo, EPUSP, 1999.

SEDRA, A. S.; SMITH, K. C. **Microeletrônica.** 4. ed. São Paulo: Makron Books, 2000.

STEVENSON Jr, W. D. **Elementos de análise de sistemas de potência.** Tradução de Ademaro A. M. B. Cotrim. Recife: McGraw-Hill do Brasil, 1978.

TERRELL, T. J. **Introduction to Digital Filters.** 1. ed. London: Macmilan Publishers Ltd, 1980.

WANG, B.; DONG X.; BO, Z.; KLIMEK, A. **Impedance phase faults location algorithm for DRV transmission lines.** In: IEEE/PES. Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America. Bogotá, Colombia, 2008. p. 1-4.