

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

**SOLUÇÃO PARA LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM
LINHAS DE TRANSMISSÃO NÃO TRANSPOSTAS
BASEADA EM SINCROFASORES E ALGORITMO
GENÉTICO**

FREDERICO OLIVEIRA PASSOS

Itajubá, Fevereiro de 2010

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

**SOLUÇÃO PARA LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM
LINHAS DE TRANSMISSÃO NÃO TRANSPOSTAS
BASEADA EM SINCROFASORES E ALGORITMO
GENÉTICO**

FREDERICO OLIVEIRA PASSOS

Dissertação submetida à Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Itajubá, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica.

ORIENTAÇÃO: Prof. Dr. PAULO MÁRCIO DA SILVEIRA
Universidade Federal de Itajubá

Itajubá, Fevereiro de 2010

DEDICATÓRIA

*Dedico A Todas Pessoas Que Amo E Contribuíram
Para o Sucesso Desse Trabalho , Em Especial Para
Minha Mãe Maria Cecília, Meu Pai Luiz Roberto,
Minha Irmã Cristiane, Minha Noiva Amanda E
Todos Meus Amigos e Familiares.*

AGRADECIMENTOS

- A toda minha família, em especial, ao meu falecido pai, Luiz Roberto Passos, minha mãe Maria Cecília Galdino de Oliveira, pela criação, ensinamentos, carinho, confiança e apoio incondicional.
- À minha noiva Amanda Corrêa Campos e sua família, pelo amor, apoio e confiança.
- Aos professores Paulo Márcio da Silveira e José Maria de Carvalho Filho, pelo trabalho de orientação, apoio e ensinamentos proporcionados.
- À Universidade Federal de Itajubá, pelo ensino de extrema qualidade.
- Ao GQEE – Grupo de Estudos da Qualidade da Energia Elétrica, pela confiança no meu trabalho e pelo suporte estrutural e educacional.
- Aos colegas de trabalho do GQEE, em especial, ao Msc. Frederico Oliveira Assunção pelo companheirismo e pela importante contribuição no desenvolvimento deste trabalho.
- Aos amigos da minha República, pela amizade, companheirismos e pelos momentos de lazer.
- A todos meus familiares, meus avós, tios, tias e primos pela torcida.
- Aos amigos de Volta Redonda, pela, sempre sincera e verdadeira, amizade.
- À CAPES e ao GQEE pelo apoio financeiro.

RESUMO

O principal objetivo deste trabalho de dissertação de mestrado é a apresentação de uma solução para localização de faltas em linhas de transmissão trifásicas transpostas, não transpostas ou desbalanceadas e a avaliação de seus resultados.

A metodologia é baseada em sincrofadores, transformação modal, equações de onda e um processo de busca através de algoritmo genético. O objetivo do método é obter as matrizes de transformação modal T_v e T_i capazes de desacoplar o sistema. Obtidas tais matrizes, o desacoplamento do sistema é alcançado, possibilitando, quando aplicados em algoritmo de localização de falta, uma grande melhoria na estimativa do ponto da falta em linhas desbalanceadas.

O método desenvolvido é avaliado por meio de dados oriundos de simulações computacionais executadas no ATP (*Alternative Transients Program*). O método foi desenvolvido e simulado em algoritmos através do programa MATLAB.

Mediante um razoável conjunto de dados simulados, considerando diversas alterações de características das linhas de transmissão, de faltas e de condições de simulação, os resultados são obtidos e comparados com métodos já existentes.

As conclusões são apresentadas com base na exatidão e robustez do método e na comparação com os métodos existentes. Sugestões são feitas para a melhoria do algoritmo desenvolvido.

Palavras-chave: Desacoplamento Modal, Linhas de Transmissão, Sistema Desbalanceado, Algoritmo Genético, Localização de Falta

ABSTRACT

The main objective of this MSc. dissertation is to provide a solution for fault location of transposed, untransposed or unbalanced three-phase transmission lines and evaluation of results.

The development is made based on syncphasors, modal transformation, wave equations and a search method based on genetic algorithm. The aim of the method is to obtain the modal transformation matrices T_v and T_i , necessary to totally uncoupling the system. Obtained such matrices, the decoupling of the system is achieved, allowing, when applied in fault location algorithms, a great improvement in the estimation of the point of fault in unbalanced transmission lines.

The developed method is evaluated by data from computer simulations performed on the ATP (Alternative Transients Program). The method was developed and simulated using the algorithm in MATLAB.

Under a reasonable set of simulated data, considering several changes on transmission lines characteristics, fault conditions and simulation results, the results are obtained and compared with existing approaches.

The conclusions are presented based on the accuracy of the method and comparison with existing approaches. Suggestions are made to improving the algorithm developed.

Keywords: Genetic Algorithm, Modal Decoupled, Transmission Lines, Unbalance Systems.

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	iii
AGRADECIMENTOS	iv
RESUMO.....	v
ABSTRACT.....	vi
SUMÁRIO	vii
Lista de Figuras.....	ix
Lista de Tabelas	xi
Lista de Abreviaturas e Símbolos	xii
1 <i>Introdução</i>.....	1
1.1 Considerações Iniciais	2
1.2 Relevância do Tema.....	2
1.3 Abordagem Principal e Objetivos.....	4
1.4 Estrutura da Dissertação	4
2 <i>Revisão Bibliográfica</i>.....	6
2.1 Considerações Iniciais	7
2.2 Linhas de Transmissão.....	7
2.2.1 Conceitos Básicos	7
2.2.2 Modelagem de Linhas de Transmissão.....	8
2.2.3 Representação Matricial de Linhas de Transmissão Trifásicas	10
2.2.4 Cálculo dos Elementos das Matrizes <i>ZFase</i> e <i>YFase</i>	12
2.3 Localização de Falta	12
2.3.1 Tipos de Localização de Falta	13
2.3.2 Métodos Baseados em Componentes de Freqüência Fundamental	14
2.3.2.1 Algoritmos que Utilizam Dados Somente do Terminal Local da Linha	14
2.3.2.2 Algoritmos que Utilizam Dados de mais de um Terminal da Linha	15
2.3.3 Métodos Baseados em Transitórios de Alta Freqüência.....	17
2.4 Considerações Finais	17
3 <i>Ferramentas Utilizadas</i>.....	18
3.1 Considerações Iniciais	19
3.2 Unidades de Medição Fasorial - UMF.....	19
3.2.1 Comentários Iniciais	19
3.2.2 Unidade de Medição Fasorial - UMF	20
3.3 Equações de Bergeron	22
3.3.1 Modelo de Linhas de Transmissão Monofásica a Parâmetros Distribuídos	22
3.3.2 Desacoplamento modal através da teoria de autovalores e autovetores	23
3.3.3 Definição das Equações de Bergeron	24
3.4 Algoritmos Genéticos	26
3.4.1 Definição de Algoritmos Genéticos.....	26
3.4.2 Operadores Genéticos e Parâmetros de Controle	28
3.5 Considerações Finais	31
4 <i>Modelos para Simulações</i>.....	32
4.1 Considerações Iniciais	33
4.2 MATLAB.....	33
4.3 ATP	34

4.3.1	Ferramenta ATP	34
4.3.2	Sistema Adotado como Referência e Modelado no ATP – LT1	34
4.3.2.1	Fontes de Alimentação	36
4.3.2.2	Impedâncias Equivalentes	36
4.3.2.3	Elementos de Representação de Faltas	36
4.3.2.4	Elementos de Medição do Sistema	37
4.3.2.5	Linha de Transmissão Modelada	37
4.3.2.5.1	Rotina LCC do ATP – Modelo Bergeron	37
4.3.2.5.2	Matrizes de Impedância e Admitância	38
4.3.3	Outros Sistemas Modelados no ATP – LT-2 e LT-3	39
4.3.3.1	Fontes de Alimentação	39
4.3.3.2	Elementos de Representação das Faltas	40
4.3.3.3	Linhos de Transmissão Modeladas	40
4.4	Considerações Finais	41
5	<i>Implementação do Método</i>	42
5.1	Considerações Iniciais	43
5.2	Motivação para Proposta	43
5.3	Primeiro Teste Realizado	45
5.4	Método Proposto de Localização de Faltas	51
5.5	Parametrização do algoritmo genético	56
5.5.1	Tamanho da população de indivíduos	57
5.5.2	Fatores de Mutação	57
5.5.3	Critério de Parada	59
5.5.4	População Pioneira	59
5.6	Considerações Finais	60
6	<i>Resultados</i>	61
6.1	Considerações Iniciais	62
6.2	Resultados de localização de falta utilizando o Algoritmo de Joe Air Jiang	62
6.3	Comparação entre o Método Implementado e o Método Utilizado por Joe Air Jiang	66
6.4	Aplicação do método desenvolvido frente a comuns variações dos parâmetros das LTs	70
6.4.1	Variação da Resistividade do Solo	71
6.4.2	Variação da Resistência dos Condutores	75
6.5	Considerações Finais	79
7	<i>Conclusões</i>	80
7.1	Conclusões e Contribuições	81
7.2	Sugestões para Trabalhos Futuros	82
8	<i>ANEXOS</i>	83
8.1	Teoria de Autovalores e Autovetores	84
8.1.1	Comentários Iniciais	84
8.1.2	Definição Formal	84
8.1.3	Cálculo dos Autovalores	85
8.1.4	Cálculo dos Autovetores	86
8.1.5	Matriz de transformação	86
8.1.6	Exemplo de Aplicação	86
9	<i>Referências Bibliográficas</i>	89

Lista de Figuras

Figura 2.1 – Modelo de Linha de Transmissão Parâmetros Distribuídos.....	9
Figura 2.2 – Modelo de Linha de Transmissão π	9
Figura 2.3 – Modelo de Linha de Transmissão T	9
Figura 2.4 – Modelo de Linha de Transmissão Longitudinal.....	9
Figura 2.5 – Modelo de Linha de Transmissão Trifásica Parâmetros Distribuídos	10
Figura 2.6 – Representação de Matriz de Impedância ou Admitância	11
Figura 2.7 – Exemplo de Matriz Z ou Y de Linha Transposta	11
Figura 2.8 – Exemplo de Matriz Z ou Y de Linha Bilateralmente Simétrica.....	11
Figura 2.9 – Exemplo de Matriz de Linha Desbalanceada	11
Figura 3.1 – Esquema de funcionamento de medição sincronizada utilizando UMFs.....	20
Figura 3.2 – Esquema básico da estrutura da UMF	21
Figura 3.3 –Desacoplamento modal do modelo de parâmetros distribuídos	25
Figura 3.4 – Representação de algoritmo genético simples.....	27
Figura 3.5 – Ilustração do método da roleta de seleção	30
Figura 4.1 – Esboço da configuração da linha modelada – LT1	35
Figura 4.2 – Modelo referência desenvolvido no ATP	35
Figura 4.3 –Segundo modelo desenvolvido no ATP	39
Figura 5.1 – Média de erros de localização de faltas monofásicas de vários casos em linhas não transpostas utilizando desacoplamento modal através de matrizes de transformação de Clarke	44
Figura 5.2 – Resultado de localização de faltas monofásicas em linhas não transpostas utilizando desacoplamento modal através de Clarke e a teoria de autovalores e autovetores	44
Figura 5.3 – Representação do diagrama de blocos utilizado no teste	45
Figura 5.4 – Resultado dos erros para os quatro casos testados	47
Figura 5.5 – Diferença fasorial entre os fasores calculados e medidos (simulados)	48
Figura 5.6 – Resultados da variável “Erro” em % para cada grupo de teste	49
Figura 5.7 – Resultado da diferença fasorial entre valores calculados e medidos.....	50
Figura 5.8 – Representação do conjunto de variáveis das matrizes Z e Y	51
Figura 5.9 – Representação do indivíduo das matrizes Z e Y	52
Figura 5.10 – Representação do algoritmo genético para otimização do método de tentativas de acerto e erro.	53
Figura 5.11 – Criação de novos indivíduos através de cruzamentos e mutações	53
Figura 5.12. - Algoritmo proposto para o cálculo do nível de aptidão (<i>Fitness Level</i>)	54
Figura 5.13 - Sistema adotado para a localização de falta.....	56
Figura 5.14– Desempenho do algoritmo genético com relação ao tamanho da população adotada.....	57
Figura 5.15 – Desempenho do algoritmo genético com relação ao fator de mutações totais	58
Figura 5.16 – Desempenho do algoritmo genético com relação ao fator de mutações singulares	58
Figura 5.17 – Desempenho do algoritmo genético com relação ao fator de mutações singulares dos indivíduos mais fortes	58
Figura 6.1 – Erro de Localização de Faltas à 25%, 50% e 75% da LT em % do comprimento da LT para a LT-1 modelada na condição transposta e não transposta	63

Figura 6.2 – Erro de Localização de Faltas à 25%, 50% e 75% da LT em % do comprimento da LT para a LT-2 modelada na condição transposta e não transposta	64
Figura 6.3 – Erro de Localização de Faltas à 25%, 50% e 75% da LT em % do comprimento da LT para a LT-3 modelada na condição transposta e não transposta	65
Figura 6.4 – Comparação entre o método desenvolvido e o utilizado por Joe Air para faltas na LT-1 em condição não transposta	67
Figura 6.5 Comparação entre o método desenvolvido e o utilizado por Joe Air para faltas na LT-2 em condição não transposta	68
Figura 6.6 – Comparação entre o método desenvolvido e o utilizado por Joe Air para faltas na LT-3 em condição não transposta	69
Figura 6.7 – Erro de Localização de Faltas à 25%, 50% e 75% da LT em % do comprimento da LT para a LT-1 modelada na condição transposta e não transposta – Variação da Resistividade do Solo	72
Figura 6.8 – Erro de Localização de Faltas à 25%, 50% e 75% da LT em % do comprimento da LT para a LT-2 modelada na condição transposta e não transposta – Variação da Resistividade do Solo	73
Figura 6.9 – Erro de Localização de Faltas à 25%, 50% e 75% da LT em % do comprimento da LT para a LT-3 modelada na condição transposta e não transposta – Variação da Resistividade do Solo	74
Figura 6.10 – Erro de Localização de Faltas à 25%, 50% e 75% da LT em % do comprimento da LT para a LT-1 modelada na condição transposta e não transposta – Variação da Resistência dos Condutores	76
Figura 6.11 – Erro de Localização de Faltas à 25%, 50% e 75% da LT em % do comprimento da LT para a LT-2 modelada na condição transposta e não transposta – Variação da Resistência dos Condutores	77
Figura 6.12 – Erro de Localização de Faltas à 25%, 50% e 75% da LT em % do comprimento da LT para a LT-3 modelada na condição transposta e não transposta – Variação da Resistência dos Condutores	78
Figura 8.1 – Vetores antes e após transformação linear	84

Lista de Tabelas

Tabela 4.1 – Tabela de tensões dos equivalentes Thévenin	36
Tabela 4.2 – Tabela de impedâncias equivalentes Thévenin.....	36
Tabela 4.3 – Tabela de dados geométricos da LT-1 modelada	37
Tabela 4.4 – Tabela de tensões dos equivalentes Thévenin	39
Tabela 4.5 – Tabela de dados geométricos da LT-2 modelada	40
Tabela 4.6 – Tabela de dados geométricos das LT-3 modelada.....	40
Tabela 5.1 – Testes realizados no diagrama de bloco da Fig. 5.3	47

Lista de Abreviaturas e Símbolos

A	Ampères
A/D	Analógico para Digital
AT	Alta Tensão
AGs	Algoritmos Genéticos
ATP	<i>Alternative Transient Program</i>
CHC	<i>Cross generational elitist selection, heterogeneous recombination and Cataclysmic mutation</i>
Cm	Centímetro
D(i)	Valor entre 0 e 1 da posição da falta no domínio modal
dC	Elemento infinitesimal de Capacitância
dL	Elemento infinitesimal de Indutância
dR	Elemento infinitesimal de Resistência
dx	Elemento infinitesimal de Comprimento
EAT	Extra Alta Tensão
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i> (Transformada rápida de Fourier)
GPS	<i>Global Position System</i>
Hz	Unidade de Frequência
i	Índice dos modos
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
kV	Kilo Volts
L	Comprimento total da Linha de Transmissão
LCC	<i>Line/Cable Constant</i>
LT(s)	Linha(s) de Transmissão
m	Metros
Modelo π	Modelo de LT a parâmetros concentrados com elemento <i>shunt</i> nos extremos
Modelo T	Modelo de LT a parâmetros concentrados com elemento shunt central
ms	Mili-segundos
MW	Unidade de Potencia Ativa
MVar	Unidade de Potencia Reativa
Oc	Operador Cruzamento
Om	Operador Mutação

p.u.	Por unidade
PPS	Pulsos por segundo
PSD	Processadores de Sinais Digitais
R	Terminal de recepção da LT
\mathfrak{R}	Conjunto dos números Reais
RNAs	Redes Neurais Artificiais
S	Terminal de envio da LT
T_v	Matriz de transformação modal de Tensão
T_i	Matriz de transformação modal de Corrente
TCs	Transformador de Corrente
TPs	Transformador de Potencial
TW	Transformada Wavelet
UMF	Unidade de Medição Fasorial
UAT	Ultra-Alta Tensão
WT	<i>Wavelet Transform</i> (Transformada Wavelet)
Zc	Impedância Característica
γ	Coeficientes de Propagação
$\Omega.m$	Unidade de Resistividade do Solo
Ω/Km	Unidade de Impedância por unidade de comprimento
\mathfrak{O} / Km	Unidade Admitância por unidade de comprimento

Capítulo 1

Introdução

1.1 Considerações Iniciais

Este capítulo apresenta os principais objetivos da dissertação de mestrado, bem como descreve a estrutura utilizada ao longo do texto.

1.2 Relevância do Tema

Na sociedade atual a energia elétrica é de vital importância no âmbito residencial, comercial e industrial. Desse modo surge a necessidade cada vez maior de um fornecimento ininterrupto e de qualidade, onde pequenas interrupções de fornecimento já são suficientes para acarretar grandes prejuízos para todos estes setores da sociedade.

Grandes esforços estão sendo empreendidos na busca de uma melhor qualidade do fornecimento da energia elétrica, mas falhas e problemas são inerentes nos processos de geração, transmissão e distribuição desta energia. A complexidade e extensão destes sistemas os deixam vulneráveis a vários potenciais agentes de falhas, que podem resumidamente ser citados como agentes naturais, falhas humanas e limites de operação. Sendo assim, a qualidade do processo de fornecimento da energia elétrica é sustentada por esforços que buscam diminuir ao máximo todos os potenciais problemas e falhas dos sistemas.

Com o avanço da tecnologia e a necessidade de um sistema elétrico cada vez mais eficiente, a busca pela qualidade do sistema elétrico é intensificada através de melhorias no desenvolvimento de equipamentos; melhorias e expansões dos sistemas de geração, transmissão e distribuição; e melhorias nos sistemas de medição, supervisão, controle e proteção.

Até pouco tempo eram necessárias simplificações nos sistemas de medição, supervisão, controle e proteção, dadas as limitações de poder computacional e de comunicação de equipamentos, tais como em relés de proteção, conversores A/D, estimadores de estado, supervisórios, registradores de eventos entre outros. Entretanto, tais simplificações passaram gradativamente a ser dispensáveis devido ao rápido avanço tecnológico. Complementando esse fato, o uso de transdutores de tensão e de corrente cada vez mais exatos e precisos diminuem ainda mais as fontes de erros inerentes dos processos de medição, que por sua vez, tem sido tolerados ao longo dos anos.

Com base em tais conceitos, estudos cada vez mais aprofundados dos fenômenos eletromagnéticos, bem como o desenvolvimento de modelos, métodos e algoritmos mais abrangentes e exatos passam a ser necessários.

É o caso dos estudos e aplicações envolvendo linhas de transmissão (LT), de modo a torná-las mais observáveis e controláveis.

Em um sistema elétrico, ainda que não seja tão comum uma linha de transmissão não-transposta, alguns efeitos similares da não transposição podem existir, como por exemplo, em linhas fisicamente próximas de outras, mesmo em pequenos trechos ao longo de seu caminho, ou naquelas com multicondutores não simétricos. No caso de linhas paralelas, o forte acoplamento eletromagnético irá causar desequilíbrios considerando a circulação das correntes de carregamento, fazendo com que as linhas fiquem com tensões assimétricas, como numa linha não transposta. Muitos dos problemas causados por estes arranjos físicos ainda são assuntos de investigação (Operador Nacional do Sistema – ONS, 2002).

Típicos problemas estão relacionados aos erros introduzidos em métodos de estimação de estado, localização de falta e estimativa de local de falta por relés de proteção de distância (Gilany *et alii*, 1992) e (Monteiro *et alii*, 2004). Para este último caso, sobrealcance ou subalcance pode ocorrer, dependendo da posição da falta e de outras condições existentes no momento de uma falta.

Desse modo, constata-se que a diagonalização não ideal das matrizes Z_{Fase} e Y_{Fase} de linhas desbalanceadas pode trazer prejuízos para a proteção de distância, estimativa de estado e localizadores de falta, já que os algoritmos para a realização destas tarefas consideram os sistemas equilibrados e balanceados. Um exemplo é o uso da matriz de Clarke no desacoplamento das tensões e das correntes de sistemas desequilibrados, a qual não é capaz de desacoplar os componentes de fase.

As matrizes T_v e T_i , as quais são obtidas da teoria dos autovalores e autovetores, são bastante conhecidas como elementos de transformação modal para obter um completo desacoplamento do sistema, como apresentado por Wedepholt (1963). Este processo vem sendo assim realizado já há muito tempo em programas para estudos de transitórios eletromagnéticos (W. Dommel, 1987). Sabe-se que o grande problema dessa técnica reside na necessidade do conhecimento das matrizes de impedância Z_{Fase} e admitância Y_{Fase} , as quais podem ser obtidas através das características geométricas e elétricas da linha de transmissão com o uso de rotinas computacionais apropriadas. No entanto, os parâmetros da linha estarão sujeitos a mudanças condicionadas aos diversos eventos, tais como

carregamento da linha, condições climáticas, variações na resistividade do solo, etc.. Percebe-se que estas dinâmicas comprometem as matrizes Z_{Fase} e Y_{Fase} , que são, a princípio, assumidas como valores fixos. Conseqüentemente, as matrizes de transformação modal de tensão e de corrente, T_v e T_i respectivamente, estarão também comprometidas.

No tratamento de sistemas desequilibrados, muitos pesquisadores vêm propondo simplificações que consideram o sistema equilibrado utilizando a conhecida matriz de Clarke, dentre outras (Johns, 1990). Porém, estes métodos trazem grandes erros para linhas longas de alta e extra alta tensão. Métodos de ajuste das matrizes de desacoplamento modal de linhas equilibradas também são propostos, como apresentado por Prado (2005) e Brandão Faria (1997). Entretanto, estes métodos são válidos apenas para linhas bilateralmente simétricas.

1.3 Abordagem Principal e Objetivos

Este trabalho propõe uma solução para localização precisa de faltas em linhas de transmissão trifásicas, transpostas, não transpostas ou assimétricas. A metodologia é baseada em sincronasores e um processo de busca para obtenção das matrizes de transformação T_v e T_i através de algoritmos genéticos, resultando em um correto desacoplamento do sistema. O método de busca faz uso das equações de Bergeron (W. Dommel, 1987) como critério de avaliação do desacoplamento do sistema. Utiliza-se o algoritmo de localização de falta proposto por Joe Air Jiang (2000).

A solução é aplicada a 3 (três) casos exemplos de linhas de transmissão nas condições transposta e não-transposta simuladas no ATP. O objetivo é a obtenção do desacoplamento do sistema através das matrizes de transformação T_v e T_i . Em seqüência, o algoritmo de localização de falta proposto por Joe Air Jiang (2000) é utilizado, resultando em uma razoável melhoria na estimativa do exato local de ocorrência de um curto-circuito.

Por fim, todos os resultados obtidos são analisados, juntamente com os prós e contras do método. Leva-se em consideração também, além da exatidão dos resultados obtidos, a comparação com métodos já existentes.

1.4 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação de mestrado está dividida em 7 capítulos, a saber:

1. Introdução;
2. Revisão Bibliográfica;
3. Ferramentas Utilizadas;
4. Modelos para Simulações;
5. Método Implementado;
6. Resultados;
7. Conclusões.

No Capítulo 1, são apresentados comentários sobre a relevância do tema e os objetivos do trabalho. Também é descrita a estrutura da dissertação de mestrado.

O Capítulo 2 (revisão bibliográfica) traz o básico da teoria de modelagem de linhas de transmissão, o estado da arte em localização de falta baseada na medição fasorial sincronizada.

O Capítulo 3 apresenta a base teórica dos equipamentos necessários para implementação da metodologia (UMF – Unidade de Medição Fasorial), os conceitos das equações de Bergeron e a filosofia e aplicação de algoritmos genéticos para otimização de processos de busca.

O Capítulo 4 trata das ferramentas computacionais utilizadas para o desenvolvimento do algoritmo proposto e dos modelos, assim como da modelagem dos sistemas elétricos simulados (fontes, LTs, faltas, filtros, etc.).

O Capítulo 5 apresenta o método implementado para a localização de faltas utilizando medição fasorial sincronizada juntamente com um método de busca das matrizes T_v e T_i através de algoritmo genético. A aplicação se faz utilizando o algoritmo proposto por Joe Air Jiang.

O Capítulo 6 mostra e analisa os resultados das simulações computacionais do algoritmo de localização de faltas proposto por Joe Air Jiang frente a diversas faltas em 3 modelos de LT na condição transposta e não transposta. Compara os resultados obtidos entre método desenvolvido e o proposto por Joe Air. Assim como, apresenta os resultados de localização de diversas faltas frente a variações dos parâmetros das LTs.

Por fim, o Capítulo 7 traz as conclusões do trabalho de dissertação, comenta sobre as contribuições alcançadas e faz sugestões de melhorias para futuros trabalhos.

Equation Chapter 2 Section 1

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

2.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo são apresentados os principais conceitos necessários para a compreensão do trabalho proposto no que diz respeito à modelagem de linhas de transmissão e suas características e o estado da arte em localização de falta através de sincrofatores.

2.2 Linhas de Transmissão

2.2.1 Conceitos Básicos

Conforme apresentado por Fuchs (1977), a rede elétrica é estruturada verticalmente de acordo com as funcionalidades de cada sistema, sendo eles classificados em geração, transmissão / subtransmissão e distribuição.

O sistema de transmissão é responsável pelo transporte de grandes blocos de energia a longas distâncias, sendo composto de todas as redes responsáveis por interligar as grandes instalações de geração e regiões de consumo. Tem como característica transmitir grandes potências através de linhas aéreas, em elevados níveis de tensão, longas distâncias e com configuração malhada. Costuma-se ser chamado de rede básica de transmissão.

O sistema de subtransmissão é composto por todas as redes responsáveis por fazer a conexão da distribuição à transmissão, além de conectar consumidores de grande porte. Tem as mesmas características do sistema de transmissão, porém com um menor nível de tensão, nível de potência e comprimento, e uma configuração mais radial, podendo, às vezes, ter as mesmas características do sistema de transmissão.

Uma linha de transmissão é composta basicamente por cabos condutores, cadeia de isoladores, estruturas metálicas de sustentação, pára-raios e acessórios diversos para melhoria das propriedades elétricas e mecânicas, tais como, anéis de corona, espaçadores, dispositivos antivibrantes, dentre outros.

Além dos componentes que constituem a linha, as dimensões e as configurações das estruturas são fundamentais. Tais estruturas terão tantos pontos de suspensão quantos forem os cabos condutores e cabos pára-raios a serem suportados. Suas dimensões e formas dependem de diversos fatores, tais como: disposição dos condutores, distância entre condutores, dimensões e formas de isolamento, flechas dos condutores, altura de segurança

e número de circuitos. Em linhas trifásicas, basicamente, existem três tipos de disposição de condutores: triangular, horizontal e vertical. As principais dimensões são determinadas principalmente pela tensão nominal e as sobretensões previstas, assim como, a flecha e o diâmetro dos condutores.

O comprimento da linha, a potência a ser transmitida, o nível de tensão, o trajeto da linha, o tipo de torre, a quantidade de circuitos por torre, o tipo de condutor, o aterramento e a transposição ou não dos circuitos são definidos nos projetos para que haja a viabilidade econômica e atenda a todos os requisitos técnicos necessários.

Normalmente as linhas são classificadas de acordo com o nível de tensão: em linhas de ultra-alta tensão (UAT) - acima de 750kV; extra-alta tensão (EAT) - entre 330 kV e 750kV; alta-tensão (AT) - abaixo de 230kV. Linhas abaixo de 69kV podem ser consideradas linhas de distribuição. Além da classificação considerando o valor da tensão, elas podem ainda ser classificadas em função de seu comprimento combinado com o nível de tensão e denominadas de linhas curtas, médias ou longas. Finalmente podem ser de corrente alternada ou corrente contínua.

2.2.2 Modelagem de Linhas de Transmissão

Linhos de transmissão devem ser representáveis através de seus circuitos equivalentes ou modelos matemáticos da forma mais satisfatória possível e com o grau de precisão almejado.

Existem modelos aplicáveis de acordo com a definição da linha, onde o grau de complexidade e exatidão depende da classificação das linhas, sejam estas curtas, médias ou longas.

As linhas de transmissão trifásicas são constituídas por, no mínimo, três condutores paralelos e são caracterizadas pelos seguintes parâmetros:

- R – Resistência dos condutores;
- G – Condutância entre os condutores e o solo;
- L – Indutância;
- C – Capacitância entre os condutores e o solo.

As resistências são inerentes aos materiais dos cabos condutores. As condutâncias aparecem devido ao fato do isolamento dos condutores não serem perfeitos e cadeias de isoladores sendo, na maioria das vezes, desconsideradas. As indutâncias ocorrem devido à existência do campo magnético originado pelas correntes na linha de transmissão e as

capacitâncias aparecem devido à existência de cargas elétricas entre os condutores da linha e entre condutores e o solo ou partes metálicas aterradas.

Os modelos podem ser os de parâmetros distribuídos, parâmetros concentrados em modelos π ou T , ou parâmetros simplificados longitudinais, conforme Fig. 2.1, 2.2, 2.3 e 2.4 respectivamente.

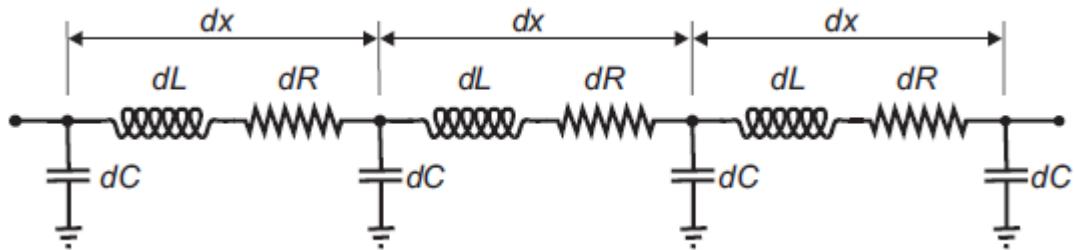


Figura 2.1 – Modelo de Linha de Transmissão Parâmetros Distribuídos.

Para o modelo de parâmetros distribuídos exatos, todos os elementos da LT são representados por unidades de comprimento infinitesimais. Os parâmetros concentrados e simplificados são obtidos partindo de simplificações das soluções das equações de onda, resultando nas representações do modelo π , T e longitudinal.

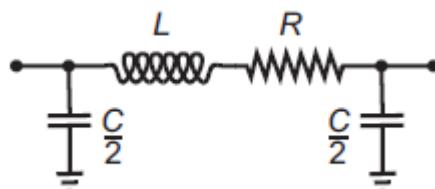


Figura 2.2 – Modelo de Linha de Transmissão π

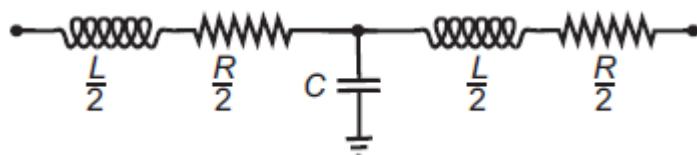


Figura 2.3 – Modelo de Linha de Transmissão T

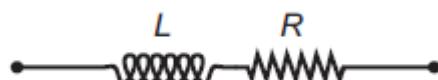


Figura 2.4 – Modelo de Linha de Transmissão Longitudinal

2.2.3 Representação Matricial de Linhas de Transmissão Trifásicas

Os modelos até então apresentados são representações de linhas de transmissão monofásicas. Sabendo-se que a maioria dos sistemas de transmissão são trifásicos, existirá um intrínseco acoplamento entre as fases, sendo que de forma geral os modelos anteriores podem ser substituídos pelo modelo mostrado na Fig. 2.5.

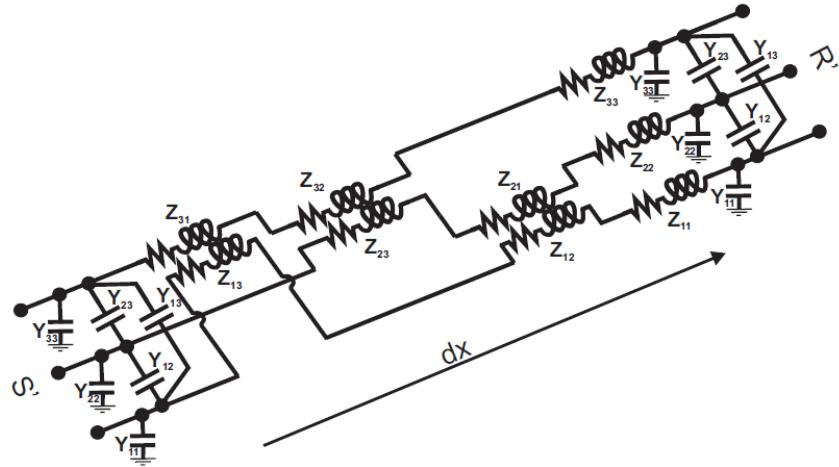


Figura 2.5 – Modelo de Linha de Transmissão Trifásica Parâmetros Distribuídos

Matematicamente, as LTs são representadas por matrizes, responsáveis por relacionar valores de correntes e tensões na LT, conforme (2.1) e (2.2).

$$\begin{matrix} \dot{V} & Z & \dot{I} & Z & \dot{I} & Z & \dot{I} \\ \dot{V} & Z & \dot{I} & Z & \dot{I} & Z & \dot{I} \\ \dot{V} & Z & \dot{I} & Z & \dot{I} & Z & \dot{I} \end{matrix} \quad (2.1)$$

$$\begin{pmatrix} \dot{I} \\ \dot{I} \\ \dot{I} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cdot & & & & & & \\ & \ddots & & & & & \\ & & \ddots & & & & \\ & & & \ddots & & & \\ & & & & \ddots & & \\ & & & & & \ddots & \\ & & & & & & \ddots \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{V} \\ \dot{V} \\ \dot{V} \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

As matrizes de impedância e admitância de fase de uma linha trifásica são criadas de acordo com a quantidade de condutores, dos parâmetros dos condutores, da disposição dos condutores e o do comprimento da linha. Caracterizam-se por serem matrizes quadradas e diagonalmente simétricas, como exemplificado na Fig. 2.6.

$$\begin{pmatrix} a & d & e \\ d & b & f \\ e & f & c \end{pmatrix}$$

Figura 2.6 – Representação de Matriz de Impedância ou Admitância

As linhas de transmissão transpostas têm uma característica peculiar, onde todos os elementos da diagonal principal das matrizes são iguais e todos os elementos fora da diagonal também são iguais entre si, conforme Fig. 2.7. Isto ocorre devido ao equilíbrio dos acoplamentos eletromagnéticos entre fases das linhas transpostas.

$$\begin{pmatrix} a & b & b \\ b & a & b \\ b & b & a \end{pmatrix}$$

Figura 2.7 – Exemplo de Matriz Z ou Y de Linha Transposta

Para linhas que não possuem a transposição e têm geometria com simetria bi-lateral (linha de transmissão com simetria em relação ao eixo da torre de sustentação), apenas alguns elementos da diagonal principal das matrizes são iguais, com elementos diferentes fora dela, como ilustrado na Fig. 2.8.

$$\begin{pmatrix} a & c & d \\ c & b & c \\ d & c & a \end{pmatrix}$$

Figura 2.8 – Exemplo de Matriz Z ou Y de Linha Bilateralmente Simétrica

Linhas não transpostas sem qualquer tipo de simetria têm a característica de matrizes com todos os elementos dentro e fora da diagonal principal diferentes, mantendo assim apenas as características de serem quadradas e diagonalmente simétricas, como na Fig. 2.9. Isso ocorre devido ao fato do acoplamento eletromagnético entre as fases serem diferentes entre si.

$$\begin{pmatrix} a & d & e \\ d & b & f \\ e & f & c \end{pmatrix}$$

Figura 2.9 – Exemplo de Matriz de Linha Desbalanceada

Os elementos da diagonal principal são chamados de elementos próprios da linha e representam os parâmetros série como resistências e indutâncias próprias. Os elementos fora da diagonal principal são chamados de elementos mútuos da linha, onde representam os parâmetros das relações entre as fases, bem como entre fases e terra, tais como indutâncias mútuas e capacitâncias.

2.2.4 Cálculo dos Elementos das Matrizes Z_{Fase} e Y_{Fase}

Tradicionalmente os elementos da matriz de impedância Z_{Fase} e da matriz de admitância Y_{Fase} de uma linha de transmissão, são obtidos através de ferramentas computacionais, as quais são baseadas nos conceitos do eletromagnetismo, nas informações da geometria da linha e nos dados de fabricante dos condutores (Dommel, 1987). As principais informações utilizadas são: número de condutores por fase; número de cabos pára-raios; posição horizontal de cada condutor em relação ao eixo vertical da torre; altura de cada condutor em relação ao solo; espaçamento entre os subcondutores; raio dos condutores; resistência do condutor; resistividade do solo; frequência; transposição ou não da LT e comprimento da flecha criada no vão entre torres.

2.3 Localização de Falta

Nas últimas décadas, o uso de dispositivos microprocessados nas soluções de problemas de sistemas elétricos de potência tem sido assunto de grande interesse. Esse interesse se deve ao rápido avanço tecnológico dos microprocessadores, aliado ao desenvolvimento na área de *software* e da comunicação de dados, tornando os dispositivos eletrônicos cada vez mais apropriados para aplicações em sistemas de potência, especialmente onde é necessária uma grande exatidão, como na localização de faltas. Um localizador de faltas, como o próprio nome diz, tem por objetivo determinar, com grande exatidão, o ponto de ocorrência de uma falta em uma linha de transmissão. Principalmente em caso de falta permanente, conhecendo-se a posição da mesma, um menor tempo é despendido nos serviços de manutenção e reparo, o que permite uma mais rápida restauração da operação. Além de prover a localização de faltas sustentadas, um localizador pode também estimar posições de faltas transitórias, as quais podem alertar para possíveis

pontos fracos nos sistemas de transmissão, evitando futuros problemas de maior grandeza (M. Silva, 2003).

2.3.1 Tipos de Localização de Falta

Um localizador de faltas pode ser implementado de três maneiras distintas, ou seja:

- 1) **como um dispositivo stand-alone:** o localizador de faltas possui um *hardware*, com um *software* dedicado a tal fim;
- 2) **como parte de um relé numérico de proteção:** neste caso, o localizador passa a ser uma sub-função do relé de proteção;
- 3) **como algoritmo independente:** a partir de dados obtidos de registradores digitais de faltas e/ou relés de proteção, um algoritmo instalado em um computador independente desempenha a função em referência.

Os localizadores de falta não precisam processar dados no modo *on-line* e, por essa razão, não estão sujeitos às restrições de processamento impostas aos relés de proteção, os quais devem operar em tempo real. Isso permite um aumento na sofisticação dos algoritmos e, portanto, na exatidão relacionada à localização das faltas, o que é particularmente desejável para as linhas longas, onde pequenos erros significam grandes distâncias ou para as linhas que atravessam locais de difícil acesso, onde poucos quilômetros de imprecisão podem comprometer a qualidade do fornecimento da energia.

Os métodos de localização têm sido classificados em duas diferentes categorias, como segue:

- 1) métodos baseados em componentes de freqüência fundamental e;
- 2) métodos baseados nos transitórios de altas freqüências gerados por uma situação de falta, também conhecidos na literatura como métodos de ondas viajantes.

As técnicas de localização podem ainda ser classificadas de acordo com o modo de obtenção dos dados, ou seja: dados provenientes de um único terminal ou dados provenientes de múltiplos terminais da linha de transmissão.

2.3.2 Métodos Baseados em Componentes de Freqüência Fundamental

Os algoritmos de localização de faltas que utilizam as componentes fundamentais e dados provenientes de apenas um terminal da linha são, em sua maioria, voltados à determinação da impedância aparente da linha de transmissão vista do local de medição. Esta impedância é obtida em função dos parâmetros da LT e dos fasores de freqüência fundamental de tensão e corrente, originados em um dos terminais da LT. Dessa forma, as estimativas da posição da falta estão sujeitas a erros devido ao efeito combinado da corrente de carga, da resistência de falta, tipo e ângulo de incidência da falta, dentre outros .

Melhorias em tais métodos são alcançadas utilizando-se de medições sincronizadas nos terminais da linha em questão. Sobre esse assunto, deve-se mencionar a necessidade de um meio de comunicação entre os terminais, de modo que os dados registrados em ambas as extremidades sejam transmitidos para um terminal de referência, com rótulo de sincronismo entre os mesmos. Neste local será realizado o processamento para a localização da falta. Os requisitos de comunicação para os localizadores são bastante simples, uma vez que o algoritmo opera em modo *off-line*, ficando apenas o sincronismo dos valores amostrados uma das principais complexidades desses métodos (M. Silva, 2003).

2.3.2.1 Algoritmos que Utilizam Dados Somente do Terminal Local da Linha

Um dos métodos utilizados para localizar faltas em linhas de transmissão, e que considera as componentes à freqüência fundamental, está baseado na determinação da impedância aparente da linha durante a falta. Esta impedância é obtida em função dos parâmetros da LT e dos fasores de tensão e corrente nos períodos pré-falta e pós-falta, extraídos dos sinais registrados em um dos terminais da LT. Entretanto, os algoritmos estão sujeitos a erros devido à contribuição de correntes provenientes dos alimentadores remotos e também devido à resistência de falta. Nesses métodos é necessário que se identifique o tipo de falta ocorrida, uma vez que o equacionamento é diferente para cada um deles.

Takagi (1982) apresentou um algoritmo de localização que utiliza componentes superpostos e modais de tensão e de corrente de pré-falta e de falta, ao invés dos valores totais para o cálculo da distância. Isso permite que um sistema trifásico seja tratado como um sistema com três circuitos monofásicos independentes, simplificando consideravelmente os cálculos necessários. O equacionamento deste algoritmo também faz uso de quadripólos e do método de Newton-Raphson.

2.3.2.2 Algoritmos que Utilizam Dados de mais de um Terminal da Linha

Com a finalidade de melhorar a precisão dos algoritmos de localização de faltas em linhas de transmissão, muitos autores propõem o uso de dados observados em ambos os terminais. Essas técnicas, geralmente, são independentes da impedância de falta e de mudanças na configuração das fontes dos sistemas de potência.

Por outro lado, torna-se necessário um meio de comunicação entre os terminais, bem como um método para determinação dos ângulos de fase das tensões e das correntes. A localização da falta só poderá ser determinada com boa exatidão se as medições em ambos os terminais forem sincronizadas.

Johns e Jamali (1990) descreveram uma técnica precisa de localização de faltas para linhas de transmissão, a qual envolve monitoramento e filtragem das ondas das tensões e das correntes medidas em ambos os terminais da LT. A partir dos fasores (\dot{V} e \dot{I}) fundamentais (60Hz) em regime permanente, calcula-se a distância pela teoria de modos naturais e a teoria de função matricial. A localização da falta independe da resistência de falta e não exige qualquer conhecimento das impedâncias das fontes. O método mantém um alto grau de exatidão e nenhuma identificação do tipo da falta é exigida.

Kalam e Johns (1991) descrevem outro método de localização de faltas para linhas de transmissão com três terminais, fundamentado nas idéias de Johns e Jamali (1990). Os dados de tensão e corrente, medidos nos três terminais, são filtrados de maneira a produzir uma medida dos fasores fundamentais em regime permanente. O algoritmo é independente da resistência de falta e não exige qualquer conhecimento das impedâncias das fontes e do tipo da falta. O algoritmo também não requer um pré-conhecimento da seção na qual a falta ocorreu.

Joe Air Jiang (2000), estima os parâmetros da linha, para utilizá-los na localização de falta baseado na medição fasorial sincronizada. Com os valores das impedâncias características e o coeficientes de propagação modais 0, 1 e 2 e tensões e correntes modais, a estimativa da distância de uma falta é dada por (2.3):

$$D(i) = \frac{\ln \{ [A(i) - C(i)] / [E(i) - B(i)] \}}{2\gamma(i,i) \cdot l} \quad (2.3)$$

onde os vetores $A(i)$, $B(i)$, $C(i)$ e $E(i)$, são expressas pelas equações (2.4) a (2.7) a seguir:

$$A(i) = \frac{1}{2} [\dot{V}_{Rm} i - Zc i \dot{I}_{Rm} i] \quad (2.4)$$

$$B(i) = \frac{1}{2} [\dot{V}_{Rm} i - Zc i \dot{I}_{Rm} i] \quad (2.5)$$

$$C(i) = \frac{1}{2} e^{[-\gamma(i,i)l]} \quad (2.6)$$

$$E(i) = \frac{1}{2} e^{[-\gamma(i,i)l]} \quad (2.7)$$

O cálculo dos valores das impedâncias características e o coeficientes de propagação modais 0, 1 e 2 são efetuados da conforme Eqs. (2.8) a (2.10):

$$K(i) = \frac{\dot{V}_{Sm} i \dot{I}_{Sm} i}{\dot{V}_{Sm} i \dot{I}_{Rm} i} \quad \frac{\dot{V}_{Rm} i \dot{I}_{Rm} i}{\dot{V}_{Rm} i \dot{I}_{Sm} i} \quad (2.8)$$

$$Zc(i) = \frac{V_{Sm}^2(i) - V_{Rm}^2(i)}{I_{Sm}^2(i) - I_{Rm}^2(i)} \quad (2.9)$$

$$\gamma(i) = \frac{\cosh^{-1}(K(i))}{l} \quad (2.10)$$

onde:

$\dot{V}_{Sm}(i)$ e $\dot{V}_{Rm}(i)$ são fasores de tensão modais no terminais de envio (S) e de recepção (R) respectivamente;

$\dot{I}_{Sm}(i)$ e $\dot{I}_{Rm}(i)$ são fasores de correntes modais que entram nos terminais (S) e (R) respectivamente;

l é o comprimento total da linha de transmissão;

i índice dos modos de propagação 0, 1 e 2.

As distâncias $D(i)$ estimadas correspondem aos modos 0 (terra), 1 e 2 (áereos). As distâncias modais são interpretadas de acordo com o tipo de falta ocorrida. A transformação modal é realizada com a matriz de Clarke. O algoritmo é resultante da solução das equações de ondas aplicadas em ambos os lados da linha. Através da igualdade das tensões no ponto de falta encontram-se as equações propostas. O método apresenta bons resultados para a

maioria dos tipos de falta, sem qualquer influência da resistência de falta ou da impedância das fontes nas extremidades. Infelizmente, para faltas em linhas de transmissão na condição não transposta os resultados não são satisfatórios, pois, devido ao insuficiente desacoplamento modal, aparecem erros relativamente grandes (F. Passos, 2007).

2.3.3 Métodos Baseados em Transitórios de Alta Freqüência

Os métodos que utilizam às componentes de alta freqüência dos sinais transitórios gerados por uma falta estão fundamentados na teoria das ondas viajantes (BEWLEY, 1963). Tais algoritmos necessitam determinar o tempo de viagem da onda de tensão e/ou de corrente do ponto de falta até o terminal de monitoramento. A velocidade de propagação da onda é função dos parâmetros da linha. A principal limitação encontrada na implementação dos algoritmos que consideram o emprego desta teoria decorre da necessidade da utilização de elevadas taxas de amostragem. Todavia, o progresso atual da tecnologia dos conversores A/D de alta velocidade e dos processadores de sinais digitais (PSDs) de alto desempenho, como também dos transdutores ópticos de corrente e tensão, têm-se tornado possível operações de tal natureza. Além disso, técnicas como processamento paralelo tendem a viabilizar altas velocidades de execução de tais tarefas.

Mais recentemente, tem sido proposto o emprego de ferramentas inteligentes como Redes Neurais Artificiais (RNAs), assim como, aplicação de novas ferramentas matemáticas, como por exemplo, o uso da Transformada *Wavelet* (TW) ao problema de localização de faltas (SILVEIRA, 2001). Encontram-se também na literatura, trabalhos associando ambas as ferramentas, RNAs e TW, aplicadas a solução do mesmo problema (MAGNAGO, 1998).

2.4 Considerações Finais

Nos capítulos posteriores, o algoritmo de localização de falta apresentado por Joe Air Jiang (2000) será o algoritmo utilizado para implementação do método desenvolvido. O método desenvolvido é baseado neste algoritmo de localização de falta, onde a transformação modal utilizada para o desacoplamento do sistema é obtida através do método de busca proposto.

Capítulo 3

Ferramentas Utilizadas

3.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo faz-se a introdução da base teórica das ferramentas utilizadas pelo método proposto. Inicia-se o capítulo com a apresentação do instrumento necessário para obtenção dos fasores sincronizados das tensões e das correntes. Apresenta-se também, os conceitos das equações de Bergeron que relacionam as tensões e correntes ao longo de uma linha de transmissão. Finalizando o capítulo, apresenta-se os conceitos básicos sobre algoritmos genéticos e a sua aplicação em problemas de otimização.

3.2 Unidades de Medição Fasorial - UMF

3.2.1 Comentários Iniciais

No passado era muito difícil sincronizar precisamente as amostras de tensão e corrente de cada fase nas extremidades de uma linha de transmissão em razão da inexistência de uma referência comum de sincronismo.

Nos primeiros métodos, buscava-se o sincronismo através de sinais de transmissão ou através de técnicas de telecomunicação para transmitir os dados remotos para os centros de controle. Entretanto, estas soluções acarretavam alguns inconvenientes que prejudicavam a precisão do sincronismo. A necessidade de determinar os atrasos do canal de comunicação e a correta compensação para esses atrasos eram os principais inconvenientes a serem enfrentados.

Hoje em dia é possível promover uma alta precisão de sincronismo de medição (tempo menor que $1\mu s$) e reduzir o custo da solução através da utilização do sinal de sincronismo disponibilizado pelo sistema de posicionamento global (GPS- *Global Position System*).

O sistema GPS foi desenvolvido pelo governo dos Estados Unidos da América, inicialmente para fins militares, para navegação marítima e aérea. O GPS é formado por uma constelação de satélites, com cobertura global e possui uma base de tempo extremamente precisa para ser utilizada em qualquer parte do globo terrestre.

3.2.2 Unidade de Medição Fasorial - UMF

A UMF é um medidor que realiza a aquisição das tensões e das correntes de cada fase em cada extremidade das linhas de transmissão. A primeira tarefa da UMF é amostrar os sinais analógicos vindos de TCs e TP, convertendo-os em sinais digitais após conformações dos mesmos por filtros analógicos (*anti-aliasing*). Em seguida, a UMF processa os sinais através de filtros digitais, resultando em fasores de tensão e de corrente rotulados com os dados de tempo tendo como referência o sinal recebido do sistema GPS. Processados os fasores com o rótulo de tempo associado, a última tarefa da UMF é enviar ao concentrador de dados tais informações conforme Fig. 3.1. No concentrador ficam disponibilizados os valores sincronizados dos fasores medidos ao longo do sistema para aplicações diversas, como: criação e validação de modelos de sistema, visualização e medição dos estados do sistema, prognósticos do sistema, análise pós-perturbações, estimativa de parâmetros de linha, localizadores de falta, outros.

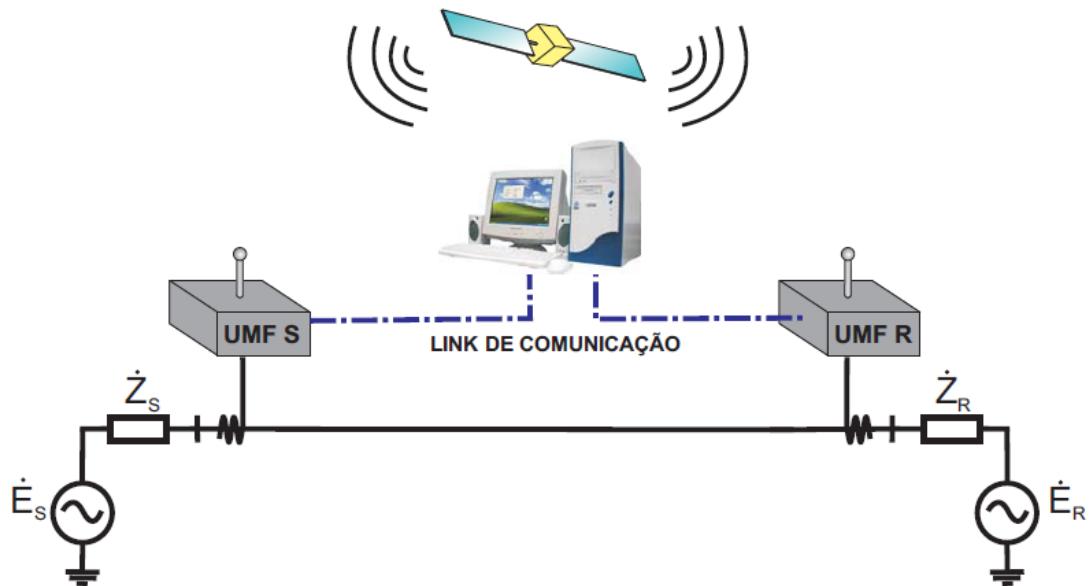


Figura 3.1 – Esquema de funcionamento de medição sincronizada utilizando UMFs

A estrutura da UMF pode ser compreendida basicamente por um sistema de aquisição a que pertencem os filtros *anti-aliasing*, o circuito oscilador (*phase-locked oscillator*), o módulo de conversão analógica / digital e por um microprocessador para o tratamento matemático das amostras. Cada UMF deve estar acoplada a um equipamento receptor de sinal de GPS.

O funcionamento do sistema de amostragem sincronizada pode ser explicado seguindo-se os blocos do diagrama da Fig. 3.2.

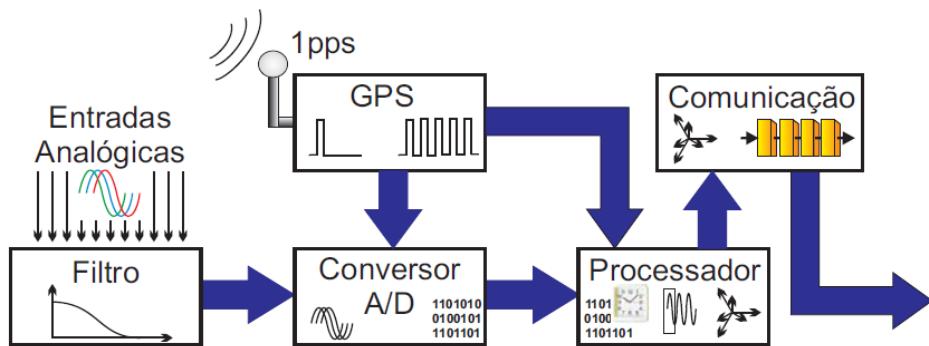


Figura 3.2 – Esquema básico da estrutura da UMF

O sistema GPS envia para as estações receptoras o sinal de um pulso por segundo (1PPS) com precisão de sincronismo de no mínimo $1\mu\text{s}$ entre as estações de cada extremidade da linha. Esse pulso é dividido em um número maior de pulsos com o intuito de aumentar o número de amostras por segundo. Deste modo, partindo dos secundários dos transformadores de corrente e de potencial, são realizadas aquisições simultâneas dos sinais analógicos de corrente e de tensão já filtrados previamente para evitar o efeito de sobreposição espectral (*aliasing*). Realizada a conversão A / D (Analógica / Digital), diferentes métodos de tratamento de dados podem ser empregados, sendo a Transformada Discreta de Fourier (DFT), a ferramenta matemática mais utilizada. Com os fasores sincronizados obtidos, estes são enviados para o concentrador de dados através de canais de comunicação, disponibilizando-os para diversas finalidades (PHADKE, 1993).

As atuais normas IEC-1344 e o IEEE C37.118 determinam o formato dos dados fasoriais, especificam o formato de dados do enlace entre a UMF e o concentrador de dados, além de estabelecerem a transmissão de alguns outros dados obrigatórios relacionados à sincronização temporal, sendo tais procedimentos normalmente chamados de padrão de formatação de dados sincrofasoriais. Dessa forma, busca-se facilitar a transmissão de dados e informações entre os equipamentos que compõe o sistema, além de garantir que equipamentos de fabricantes diferentes apresentem medidas coerentes entre si.

3.3 Equações de Bergeron

3.3.1 Modelo de Linhas de Transmissão Monofásica a Parâmetros Distribuídos

Para obter uma solução exata para qualquer linha de transmissão, deve-se considerar o fato de que os parâmetros de uma linha não estão concentrados e sim uniformemente distribuídos ao longo da mesma (Stevenson, 1978).

Sejam as equações diferenciais de tensão e de corrente por unidade de comprimento (3.1) e (3.2).

$$-\left[\frac{d\dot{V}_{Fase}}{dx} \right] - [Z'_{Fase}] [\dot{I}_{Fase}] \quad (3.1)$$

$$-\left[\frac{d\dot{I}_{Fase}}{dx} \right] = [Y'_{Fase}] [\dot{V}_{Fase}] \quad (3.2)$$

Derivando (3.1) e (3.2) uma segunda vez em relação ao comprimento, vem:

$$-\left[\frac{d^2\dot{V}_{Fase}}{dx^2} \right] = [Z'_{Fase}] [Y'_{Fase}] [\dot{V}_{Fase}] \quad (3.3)$$

$$-\left[\frac{d^2\dot{I}_{Fase}}{dx^2} \right] = [Y'_{Fase}] [Z'_{Fase}] [\dot{I}_{Fase}] \quad (3.4)$$

Tais equações diferenciais de segunda ordem (3.3) e (3.4) definem todo o comportamento das tensões e das correntes ao longo da linha de transmissão monofásica.

Como solução de (3.3) e (3.4) tem-se (3.5) e (3.6):

$$\dot{V} = A_1 e^{ZYx} + A_2 e^{-\sqrt{ZY}x} \quad (3.5)$$

$$\dot{I} = \sqrt{Z/Y} A_1 e^{\sqrt{ZY}x} - \frac{1}{\sqrt{Z/Y}} A_2 e^{-\sqrt{ZY}x} \quad (3.6)$$

As constantes A_1 e A_2 são determinadas pela condição de contorno definida no extremo da linha ($x = 0$, $\dot{V}_R = V_R$ e $\dot{I}_R = I_R$), resultando nas equações (3.7) a (3.10):

$$\dot{V} = \left(\frac{\dot{V}_R + \dot{I}_R Z_c}{2} \right) e^{\gamma x} + \left(\frac{\dot{V}_R - \dot{I}_R Z_c}{2} \right) e^{-\gamma x} \quad (3.7)$$

$$\dot{I} = \left(\frac{\dot{V}_R Z_c + \dot{I}_R}{2} \right) e^{\gamma x} - \left(\frac{\dot{V}_R Z_c - \dot{I}_R}{2} \right) e^{-\gamma x} \quad (3.8)$$

$$Zc = \sqrt{\frac{Z}{Y}} \quad (3.9)$$

$$\gamma = \sqrt{ZY} \quad (3.10)$$

Sendo: Zc é a Impedância Característica e γ é o Coeficiente de Propagação das ondas.

As equações (3.7) e (3.8) fornecem os valores de \dot{V} e \dot{I} em qualquer ponto da linha, em função da distância x contada a partir dos terminais da carga, supondo o conhecimento de V_R , I_R , e dos parâmetros da linha.

3.3.2 Desacoplamento modal através da teoria de autovalores e autovetores

Com a teoria dos autovalores e autovetores apresentada no Anexo I pode-se escrever as equações (3.3) e (3.4) de um sistema acoplado trifásico. Através do desacoplamento modal é possível transformar sistemas acoplados no domínio de fase em equações desacopladas e no domínio modal, conforme (3.11) e (3.12), desde que se encontrem os autovalores Λ_1 de $[Z'_{Fase}][Y'_{Fase}]$ e Λ_2 de $[Y'_{Fase}][Z'_{Fase}]$. Assim pode-se escrever:

$$-\left[\frac{d^2 V_{mod}}{dx^2} \right] = [\Lambda_1][V_{mod}] \quad (3.11)$$

$$-\left[\frac{d^2 I_{\text{mod}}}{dx^2} \right] = [\Lambda_2][I_{\text{mod}}] \quad (3.12)$$

As relações entre os parâmetros de fase e de modo passam a ser (3.13) a (3.16):

$$V_{\text{Fase}} = [T_v][V_{\text{mod}}] \quad (3.13)$$

$$V_{\text{mod}} = [T_v]^{-1}[V_{\text{Fase}}] \quad (3.14)$$

$$I_{\text{Fase}} = [T_i][I_{\text{mod}}] \quad (3.15)$$

$$I_{\text{mod}} = [T_i]^{-1}[I_{\text{Fase}}] \quad (3.16)$$

Sendo T_v e T_i , respectivamente, as matrizes de transformação modal de tensão e de corrente, obtidas através do arranjo em colunas dos autovetores das matrizes $[ZY_{\text{Fase}}]$ e $[YZ_{\text{Fase}}]$ (Dommel, 1987). Define-se a matrizes $[ZY_{\text{mod}}]$ e $[YZ_{\text{mod}}]$ modais através de (3.17) e (3.18):

$$[ZY_{\text{mod}}] = [\Lambda_1] = [T_v]^{-1}[Z'_{\text{Fase}}][Y'_{\text{Fase}}][T_v] \quad (3.17)$$

$$[YZ_{\text{mod}}] = [\Lambda_2] = [T_i]^{-1}[Y'_{\text{Fase}}][Z'_{\text{Fase}}][T_i] \quad (3.18)$$

A matriz $[ZY_{\text{mod}}]$ é desacoplada e composta pelos autovalores de $[ZY_{\text{Fase}}]$, da mesma forma que $[YZ_{\text{mod}}]$ é desacoplada e composta pelos autovalores de $[YZ_{\text{Fase}}]$.

A transformação modal para $[Z_{\text{Fase}}]$ e $[Y_{\text{Fase}}]$ é dada por (3.19) e (3.20):

$$[Z_{\text{mod}}] = [T_i]'[Z'_{\text{Fase}}][T_i] \quad (3.19)$$

$$[Y_{\text{mod}}] = [T_v]'[Y'_{\text{Fase}}][T_v] \quad (3.20)$$

3.3.3 Definição das Equações de Bergeron

Sejam agora as tensões e correntes medidas no terminal de recepção (I^+), conforme Fig. 3.3, transformadas para o domínio modal (I')).

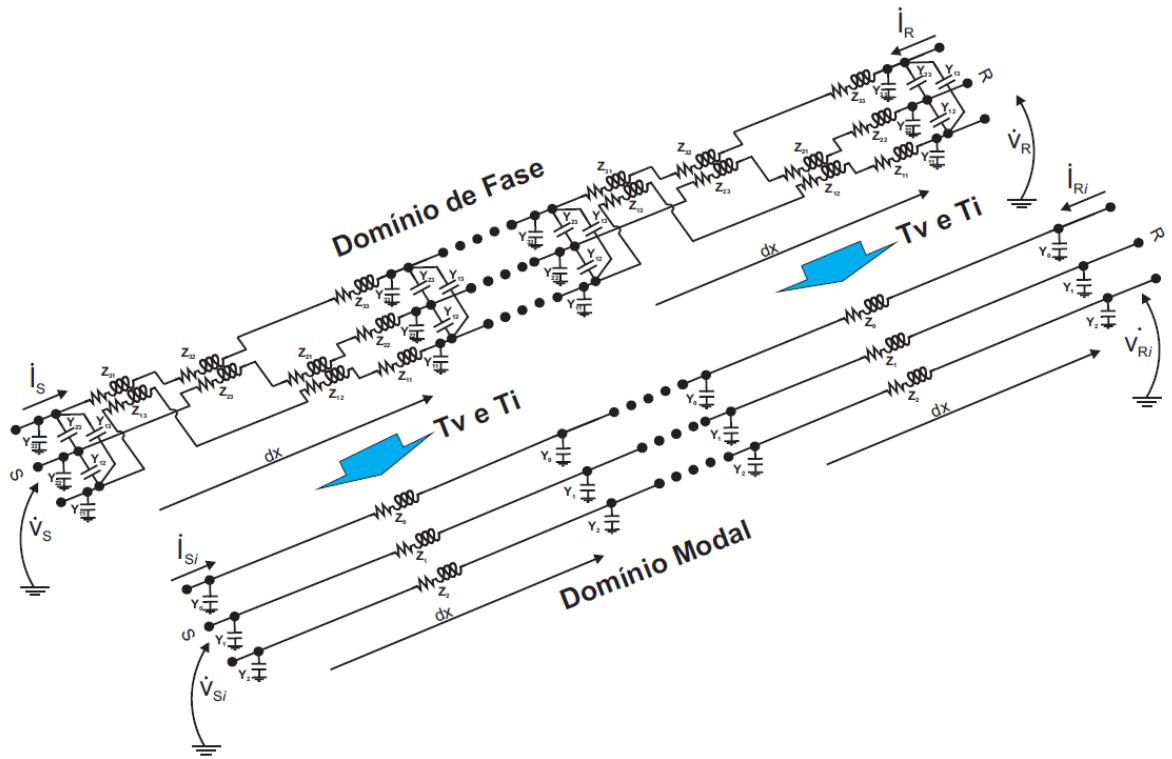


Figura 3.3 –Desacoplamento modal do modelo de parâmetros distribuídos

Considere também, no domínio modal, o coeficiente de propagação (γ_i) e a impedância característica (Zc_i), os quais são obtidos das matrizes Z_{mod} e Y_{mod} após o correto desacoplamento. Assim, de posse de todos estes elementos, as equações (3.7) e (3.8) são apresentadas não mais na forma exponencial, mas sim na forma de funções hiperbólicas, resultando nas equações de Bergeron definidas em (3.21) e (3.22):

$$V_{S_i} = V_{r_i} \cdot \cosh(\gamma_i \cdot l) - I_{r_i} \cdot Zc_i \cdot \sinh(\gamma_i \cdot l) \quad (3.21)$$

$$I_{S_i} = -I_{r_i} \cdot \cosh(\gamma_i \cdot l) + \left(\frac{V_{r_i}}{Zc_i} \right) \cdot \sinh(\gamma_i \cdot l) \quad (3.22)$$

onde:

V_{S_i} e V_{r_i} são fasores de tensão modais no terminais de envio (S) e de recepção (R) respectivamente;

I_{S_i} e I_{r_i} são fasores de correntes modais que entram nos terminais (S) e (R) respectivamente;

Zc_i e γ_i são os valores estimados da Impedância Característica e do Coeficiente de Propagação (Gama) modais, respectivamente;
 l é o comprimento total da linha de transmissão;
 i índice dos modos de propagação 0, 1 e 2.

As equações de Bergeron serão largamente utilizadas para comparação entre os sincrofatores medidos e os calculados, configurando-se uma das principais ferramentas usada no método proposto.

3.4 Algoritmos Genéticos

3.4.1 Definição de Algoritmos Genéticos

No final da década de 80, algoritmos genéticos emergiram como um robusto método de busca e otimização. Diversas áreas de processamento de sinais tais como processamento de som e imagem, filtragem de sinais e tantas outras, têm feito uso deste método.

John Holland's (1975) apresentou de forma pioneira uma visão geral de sistemas adaptativos, mostrando como processos evolutivos podem ser aplicados em sistemas artificiais. Qualquer problema envolvendo adaptação pode ser formulado em termos genéticos. Desde que formulados nesses termos, cada problema pode ser então solucionado com a aplicação dos chamados algoritmos genéticos.

Algoritmos Genéticos (AGs) são algoritmos de busca baseados nos mecanismos de seleção natural e na genética natural, Goldberg (1989). Eles combinam a sobrevivência dos mais aptos entre as estruturas de *string* existentes, a partir de uma combinação randomizada entre os membros de uma determinada população.

Normalmente os AGs são utilizados para solucionar problemas de otimização onde o espaço de busca é muito grande e os métodos convencionais se demonstram ineficientes. Uma característica marcante dos algoritmos genéticos é a sua alta probabilidade de localizar a solução ótima global em uma superfície de busca multimodal bem como em superfícies descontínuas ou não diferenciáveis.

As diferenças básicas em relação aos métodos tradicionais são:

- 1- Um AG trabalha com a codificação do conjunto de parâmetros pertinentes ao problema, ao invés de trabalhar com os próprios parâmetros.

- 2- Um AG executa uma busca a partir de uma população de pontos de modo “paralelo”.
- 3- Um AG utiliza informações sobre o problema, ao invés de derivadas ou outras ferramentas analíticas.
- 4- Um AG utiliza regras probabilísticas, ao invés de determinísticas.
- 5- AGs são provados ser, teórica e empiricamente, robustos na busca de pontos ótimos em espaços complexos.

Portanto, como nos processos de evolução da natureza, onde os mais fortes e seus descendentes possuem as maiores probabilidades de sobrevivência, um AG irá se utilizar de repetidas seleções e cruzamentos, recombinando cromossomos (informações genéticas) de modo a realizar uma contínua evolução da raça através de um processo probabilisticamente guiado. Assim, a estrutura básica de um algoritmo genético é ilustrado na Fig.3.4:

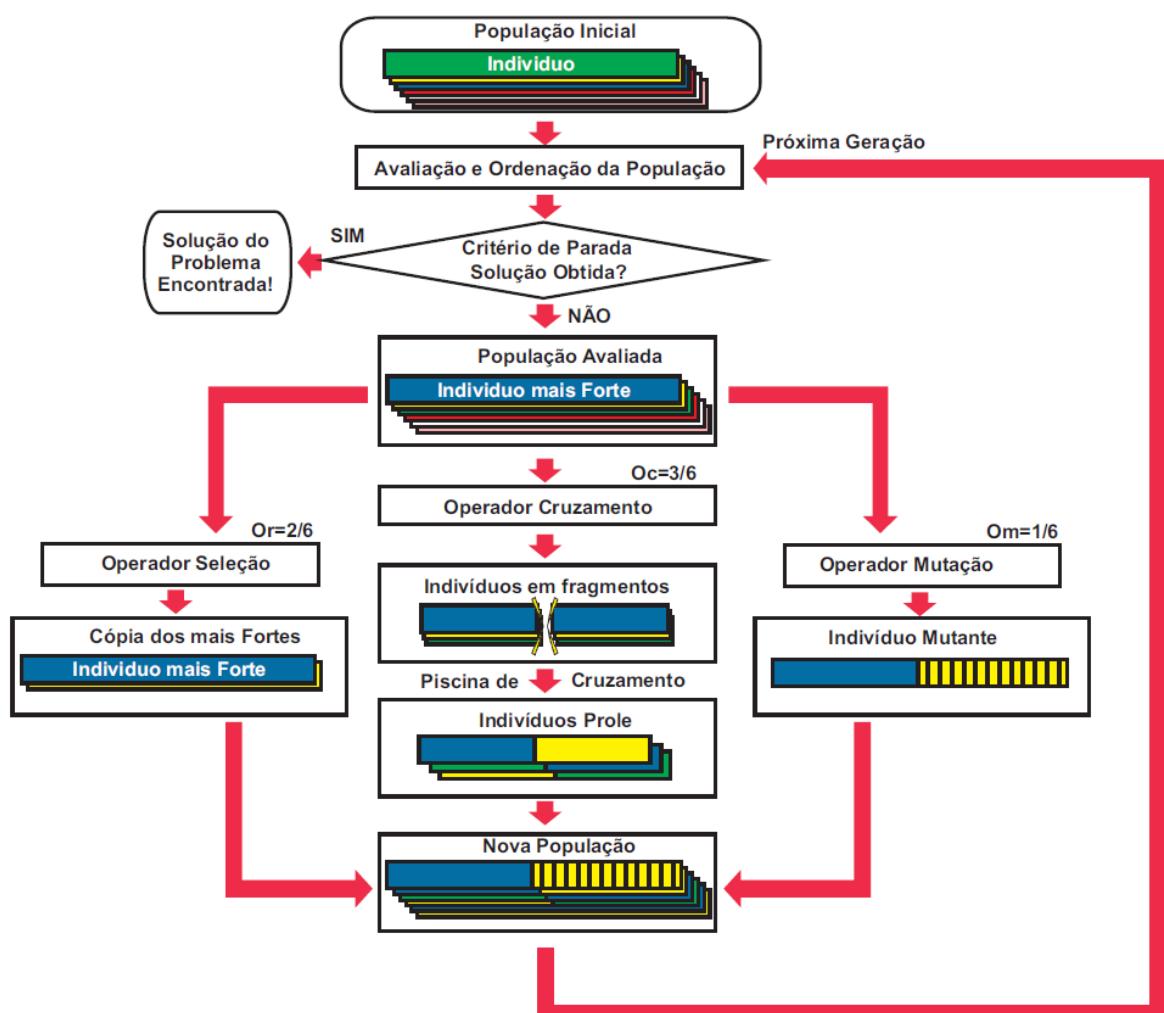


Figura 3.4 – Representação de algoritmo genético simples

Após agrupar os indivíduos resultantes de todas as operações é obtida a nova população. Tal população é novamente avaliada e ordenada, assim como uma nova verificação do critério de parada dando inicio ao novo ciclo do processo. Enquanto os critérios de paradas não são alcançados, o processo continua ao longo das gerações e os indivíduos de cada população evoluem para a solução ótima do problema modelado.

Vale ressaltar que um grande número de variações do algoritmo pode existir. A representação acima é apenas um exemplo, pois mutações podem ocorrer após o cruzamento, ou as três operações podem ocorrer em sequência, dentre outras possibilidades.

Diferentemente dos algoritmos genéticos convencionais, tem sido apresentado na literatura Eshelman (1991) o algoritmo *Cross generational elitist selection, heterogeneous recombination and Cataclysmic mutation* (CHC), o qual pode ser considerado como um tipo “mais agressivo”. Após o cruzamento, feito aleatoriamente, os N melhores indivíduos são coletados levando-se em consideração a população atual e a população gerada após o cruzamento. A seleção está implícita no algoritmo, a partir do momento que se escolhe os melhores indivíduos de cada população (anterior e atual). Normalmente, populações pequenas com 50 indivíduos, por exemplo, são utilizados no CHC. Para se solucionar o problema de convergência prematura para mínimos locais é utilizada uma alta taxa de mutação, sempre preservando o melhor indivíduo da população (M.Miranda).

3.4.2 Operadores Genéticos e Parâmetros de Controle

Mecanismo de codificação:

É fundamental que o algoritmo genético possua um mecanismo de codificação para representar as variáveis do problema a ser otimizado. O método mais comum é utilizar inteiros para representar as variáveis reais envolvidas no processo criando uma *string*. Cada *string* (também chamado de cromossomo) representa um indivíduo de uma população. Quando o problema envolve mais de uma variável, deve-se concatenar as *strings* que representam um dado ponto, obtendo-se assim um indivíduo com maior número de dados (genes).

Tamanho da população:

O tamanho da população de um AG depende muito do problema a ser atacado e, certamente, ela aumenta a medida que aumenta o número de variáveis a serem tratadas. Por se tratar de um parâmetro de controle é certo que aumentando o tamanho da população

aumenta-se a diversidade de busca reduzindo a probabilidade da chamada convergência prematura para um ótimo local. Por outro lado, grande população significa maior tempo computacional necessário para a convergência para regiões ótimas no espaço de busca. Assim, deve existir um compromisso entre tempo e precisão do processo. Nos mais comuns processos de otimização o tamanho da população varia entre 10 a 100 indivíduos, não consistindo, porém, como regra geral a ser seguida.

Função Objetivo (*Fitness*):

Em um processo de otimização, a função objetivo é aquela sobre a qual se deseja encontrar o ponto ótimo. Este ponto ótimo pode significar, por exemplo, o menor erro de um determinado processo (minimização) ou o máximo lucro de certo negócio (maximização), etc.. Assim, a função objetivo é a figura de mérito que servirá de mecanismo para avaliar cada indivíduo (*string*) de uma dada população.

Biologistas denominaram-na de função aptidão (*fitness function*). Assim, tal função fornecerá o valor de aptidão de cada indivíduo e será, portanto, o árbitro final da vida e da morte dos indivíduos. *Strings* com os mais altos graus de aptidão possuirão maior número de descendentes na próxima geração.

Operador Seleção:

Baseado nos processos naturais de sobrevivência dos mais aptos e morte dos mais fracos, no AG uma *string* mais apta tem mais chance de sobrevivência e por isto receberá um mais alto número de descendentes nas subsequentes gerações. Logo, a seleção é o processo pelo qual os indivíduos de uma geração são copiados de acordo com o seu grau de aptidão (*fitness*). Assim, a chance que uma *string* terá para ser copiada é baseada no valor de *fitness* calculada da função.

Existem diferentes maneiras de se fazer uma efetiva seleção, incluindo métodos de ordenação, torneio e esquemas proporcionais, Goldberg(1989) e Srinivas(1994). O mais simples e conhecido dessas técnicas é o processo de seleção proporcional denominado de roleta de seleção. Neste método, a idéia é criar uma roleta giratória (tipo cassino) com *slots* cujo tamanho seja proporcional ao grau de aptidão de cada elemento. Após a construção de tal roleta ponderada, basta um simples giro para que tenhamos um candidato selecionado. É óbvio que o *slot* mais largo, representando o mais apto indivíduo, terá a maior probabilidade de ser selecionado como ilustrado na Fig.3.5.

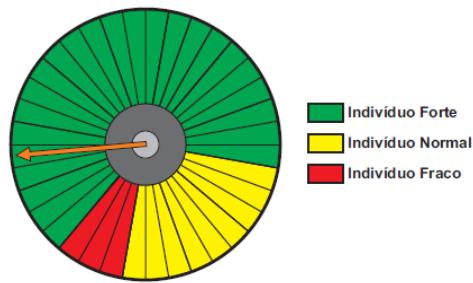


Figura 3.5 – Ilustração do método da roleta de seleção

Quanto ao número de indivíduos selecionados, isso também depende bastante do projeto do AG. Existem AGs cujo número de selecionados é igual ao número total da população. Outros, porém podem trabalhar com seleção de apenas parte da população e caso este número (tamanho da população) deva permanecer constante ao longo da rodada, diferentes métodos de reposição podem ser utilizados.

Operador Cruzamento (*Crossover*):

Para certo número de indivíduos - que pode ser igual ao número da população - o AG irá desempenhar o operador cruzamento (*crossover*). Este é um operador que combina partes de dois cromossomos, para gerar descendentes que contenham o material genético de ambos os pais. Um termo de probabilidade (O_c) é ajustado para determinar a taxa da operação. Muitos pesquisadores de AG consideram o operador *crossover* como sendo o fator determinante que distingue o AG de todos os outros algoritmos de otimização. Com o cruzamento, constata-se a existência de indivíduos melhorados na próxima geração. É óbvio que isso nem sempre deve ocorrer, pois a chance de que indivíduos piores apareçam na evolução é possível. Tal fragmentação pode ser feita de diversas formas, duas, três, quatro,..., n- fragmentos simétricos ou não do todo da *string*.

Operador Mutação:

As *strings* estão sujeitas à mutação. Assim como ocorre na natureza, onde espécies viventes podem sofrer ocasionalmente mutações, o operador aqui invocado introduz variações dentro do cromossomo (um gene muda de valor). A operação ocorre ocasionalmente controlada por uma pequena taxa de probabilidade (O_m) também denominada taxa de mutação.

3.5 Considerações Finais

Até então foram apresentadas de forma resumida todas as teorias e os conceitos necessários para a total compreensão do método proposto. Visando as simulações necessárias para os testes e validação do método, no capítulo seguinte serão apresentadas as informações necessárias para o desenvolvimento e utilização de modelos de sistemas elétricos, assim como os casos utilizados para as simulações.

Capítulo 4

Modelos para Simulações

4.1 Considerações Iniciais

Equation Chapter 4 Section 1

O primeiro passo para o estudo em questão foi a criação dos modelos de simulação das linhas de transmissão. Os modelos são capazes de reproduzir da melhor forma possível as tensões e as correntes das LTs adotadas e, em consequência, a obtenção das matrizes de impedância e admitância da mesma. Para tal, foi utilizado o programa de simulação digital de transitórios eletromagnéticos, o ATP- *Alternative Transient Program*. Ao longo do capítulo será feita uma breve apresentação dos recursos do programa utilizado e a parametrização do mesmo de acordo com os sistemas adotados para os estudos. Apresenta-se, de maneira breve, a ferramenta de programação MATLAB, utilizada para o desenvolvimento de todo o algoritmo do método proposto e a apresentação dos resultados.

4.2 MATLAB

Dada suas características de praticidade de programação, muitos usuários utilizam o MATLAB como a primeira ferramenta para o desenvolvimento de algoritmos e testes necessários a uma determinada pesquisa em desenvolvimento. Realizados os testes e concluídos os resultados, o algoritmo ou sistema desenvolvido pode, seguramente, ser implementado em outras plataformas de programação acessíveis, assim como o desenvolvimento de *hardwares* dedicados com o desenvolvimento embarcado.

Para o trabalho em questão, todo o algoritmo de localização de falta foi desenvolvido em MATLAB. Assim como a tarefa de tratamento dos sinais obtidos da simulação do ATP, onde valores de tensão e de corrente das fases de ambos os terminais são convertidos em fasores intrinsecamente sincronizados através de blocos da biblioteca do simulink (*toolbox* do MATLAB) que executam a transformada de Fourier. Obtido todos os resultados, utilizou-se a exportação de resultados para programas do pacote Office da Microsoft para apresentação gráfica dos resultados de todos os testes.

4.3 ATP

4.3.1 Ferramenta ATP

O programa ATP- *Alternative Transient Program* - é um programa digital para simular transitórios eletromagnéticos, eletromecânicos e sistemas de controle em Sistemas Elétricos de Potência polifásicos. O ATP proporciona grande capacidade de modelagem de sistemas elétricos para fins de análise de transitórios.

Baseado na aplicação da regra trapezoidal para converter equações diferenciais de uma rede elétrica em equações algébricas, o ATP tem como características simplicidade e robustez.

Como programa digital, o ATP não permite obter uma solução contínua no tempo, por isso são calculados valores a intervalos de tempo discretos. O programa permite a representação de não linearidades, elementos com parâmetros concentrados, elementos com parâmetros distribuídos, chaves, transformadores, reatores, linhas de transmissão, dentre outros. A resposta da rede elétrica no tempo é disponível para as tensões das barras e dos ramos, e para as correntes de ramos, através de uma tabela de valores ou de gráficos.

4.3.2 Sistema Adotado como Referência e Modelado no ATP – LT1

Para os primeiros testes do método proposto modelou-se um sistema de transmissão que faz a interconexão entre dois sistemas de potência. O principal objetivo da modelagem utilizando o ATP é definir ao menos dois casos exemplo de LT na condição transposta e outro na condição não transposta com resistividade de solo 1000 $\Omega \cdot m$. Para cada caso, os sincrofatores das tensões e das correntes nos extremos da LT são obtidos, assim como as matrizes de impedância Z_{Fase} e de admitância Y_{Fase} . Dessa forma, dois casos foram modelados, onde outros parâmetros como, fontes equivalentes, local e tipo de falta foram repetidos para cada caso.

Uma linha de transmissão em operação no Sistema Interligado Nacional foi escolhida para este modelo, ora na condição transposta, ora na condição não-transposta. A linha escolhida possui dois circuitos trifásicos paralelos interligando duas barras, sendo um condutor por fase. Conforme Fig. 4.1, os cabos condutores e pára-raios são dispostos simetricamente em relação ao eixo vertical da torre. A linha possui 166,6 km e opera em um

nível de tensão de 138 kV. O circuito é suspenso pelo mesmo tipo de torre em todo seu comprimento.

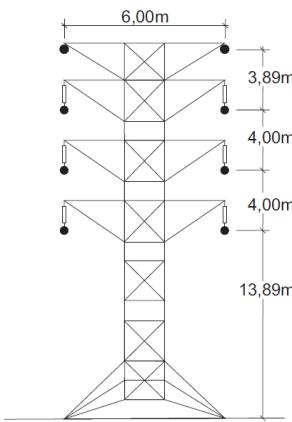


Figura 4.1 – Esboço da configuração da linha modelada – LT1

O modelo criado, conforme Fig.4.2, é constituído dos seguintes elementos: (i) dois equivalentes de Thévenin representando os sistemas de potência interligados pela linha de transmissão; (ii) a linha de transmissão representada por blocos segmentados do modelo de Bergeron disponibilizado pelo ATP; (iii) chaves temporizadas representando o curto circuito e, (iv) medidores fazendo o papel das UMFs. Utilizando os recursos do ATP, são obtidos de modo sincronizado, os valores das tensões e das correntes em ambos os terminais.

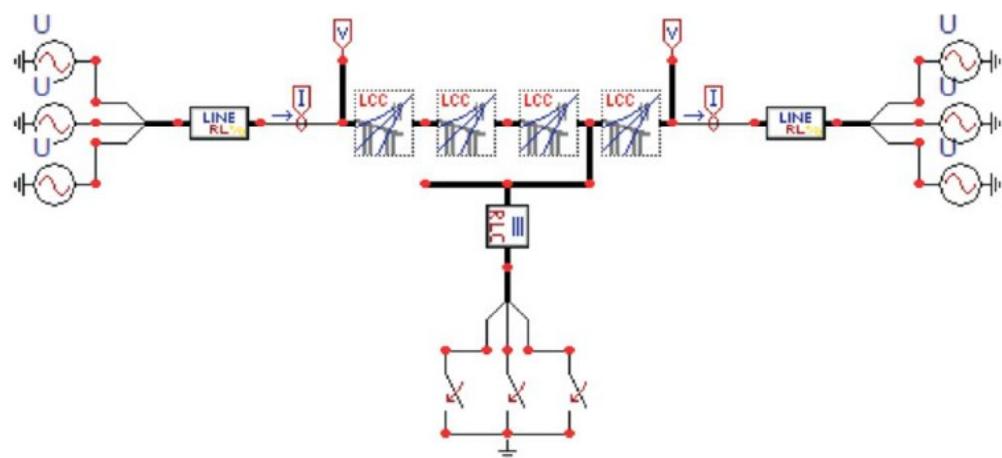


Figura 4.2 – Modelo referência desenvolvido no ATP

4.3.2.1 Fontes de Alimentação

Para existir fluxo de potencia ativa e reativa ($P_{sr} = 40\text{MW}$; $Q_{sr} = 2,3\text{MVA}$) entre os sistemas os valores das tensões adotados para os equivalentes de Thévenin nos terminais da linha estão mostradas na Tab. 4.1.

Tabela 4.1 – Tabela de tensões dos equivalentes Thévenin.

Terminal da Linha	Módulo [PU]	Ângulo [°]	Fase A [kV]	Fase B [kV]	Fase C [kV]
Envio - \dot{V}	1	0	$138,000e^{j0^\circ}$	$138,000e^{-j120^\circ}$	$138,000e^{j120^\circ}$
Recepção - \dot{V}	0,954	-5,9	$131,652e^{-j5,9^\circ}$	$131,652e^{-j125,9^\circ}$	$131,652e^{j114,1^\circ}$

4.3.2.2 Impedâncias Equivalentes

Para garantir potências de curto-circuito coerentes com sistemas reais foram adotadas impedâncias equivalentes de sequência positiva e zero para os terminais de Envio ($S_{cc3f} = 37\text{MVA}$, $S_{cc1f} = 29\text{MVA}$) e Recepção ($S_{cc3f} = 34\text{MVA}$, $S_{cc1f} = 36\text{MVA}$) conforme Tab. 4.2.

Tabela 4.2 – Tabela de impedâncias equivalentes Thévenin.

Terminal da Linha	Impedância de seqüência positiva [Ω]	Impedância de seqüência zero [Ω]
Envio - Z_s	$0,2142+j5,1418$	$2,4642+j9,0000$
Recepção - Z_r	$0,2142+j5,5710$	$0,7497+j4,6062$

4.3.2.3 Elementos de Representação de Faltas

O curto-circuito foi modelado através de chaves temporizadas em série com uma resistência. O valor utilizado como resistência de falta para esse modelo foi de 1Ω . Para um tempo total de simulação de 100ms todas as faltas ocorrem em 50 ms , sem qualquer alteração do *point-on-wave* de 0ms . A conexão dos elementos que simulam um curto-

círcuito foi feita para faltas monofásicas a 75% do comprimento total da linha, tendo como referência o terminal de envio (S).

4.3.2.4 Elementos de Medição do Sistema

As UMFs foram representadas através dos blocos de medição do ATP, tendo como objetivo a obtenção dos valores de tensão e de corrente das fases A, B e C sincronizados para ambos os lados da linha de transmissão. Cada caso de simulação foi realizado com um passo de integração de $1\mu\text{s}$ e com a duração de 100 ms, suficiente para obtenção de dados pré-falta e pós-falta. Após cada simulação, os valores de interesse foram armazenados em arquivo *.pl4, para posterior uso nos algoritmos implementados no MATLAB.

4.3.2.5 Linha de Transmissão Modelada

4.3.2.5.1 Rotina LCC do ATP – Modelo Bergeron

A rotina utilizada para a obtenção dos parâmetros da linha de transmissão foi a bem conhecida “*Line/Cable Constant – LCC*”, sendo esta uma das ferramentas do ATP. Para todos os casos considerou-se o modelo de parâmetros distribuídos baseado no método de Bergeron. Este modelo utiliza os parâmetros geométricos e elétricos da LT, resistividade do solo e comprimento como dados de entrada, resultando assim nas matrizes de impedância e admitância da linha. O mesmo permite ainda modelar linhas transpostas, não transpostas, assimétricas, circuitos simples ou duplos, cabos pára-raios, multicondutores, etc.. As equações de Bergeron são então usadas para se calcular as relações entre as tensões e as correntes ao longo do tempo em ambos os terminais. Os dados geométricos da linha são apresentados na tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Tabela de dados geométricos da LT-1 modelada

Condutor	Número da Fase	Reatância [Ω/km]	Raio do condutor [cm]	Resistência [Ω/km]	Posição Horizontal [m]	Posição Vertical [m]	Altura da Flecha [m]
1	1	0,2229	1,2573	0,0842	3	21,3104	18,3104
2	2	0,2229	1,2573	0,0842	3	17,2956	14,2956
3	3	0,2229	1,2573	0,0842	3	13,8964	10,8964
4	1	0,2229	1,2573	0,0842	-3	21,3104	18,3104
5	2	0,2229	1,2573	0,0842	-3	17,2956	14,2956
6	3	0,2229	1,2573	0,0842	-3	13,8964	10,8964
7	0	1,2068	3,5097	0,2143	3	25,2012	22,2012
8	0	1,2068	3,5097	0,2143	-3	25,2012	22,2012

A linha de comprimento total de 166,6 Km foi dividida em quatro blocos idênticos com 25% do comprimento total. Foi parametrizado para uma freqüência fundamental de 60Hz e resistividade do solo de 1000 $\Omega \cdot m$.

4.3.2.5.2 Matrizes de Impedância e Admitância

A rotina *LCC* do ATP fornece como resultado as matrizes de impedância Z_{Fase} e admitância Y_{Fase} da linha de transmissão modelada. Essas matrizes serviram então como base para o cálculo das matrizes de desacoplamento modal T_v e T_i através da teoria de autovalores e autovetores apresentada no Anexo I.

Para a LT modelada nas condições transposta e não-transposta, são apresentados a seguir os resultados encontrados das matrizes de impedância e admitância equivalentes por fase em (4.1) a (4.4):

LT não transposta e resistividade do solo igual a 1000 $\Omega \cdot m$:

$$Z_{Fase} = \begin{bmatrix} 0,0805 + 0,4444i & 0,0381 + 0,2898i & 0,0380 + 0,2657i \\ 0,0381 + 0,2898i & 0,0801 + 0,4754i & 0,0380 + 0,3213i \\ 0,0380 + 0,2657i & 0,0380 + 0,3213i & 0,0801 + 0,4924i \end{bmatrix} \Omega / Km \quad (4.1)$$

$$Y_{Fase} = \begin{bmatrix} 0,5791i & -0,1432i & -0,0702i \\ -0,1432i & 0,5853i & -0,1701i \\ -0,0702i & -0,1701i & 0,5567i \end{bmatrix} \cdot 10^{-5} \text{ S} / Km \quad (4.2)$$

LT com transposição e resistividade do solo igual a 1000 $\Omega \cdot m$:

$$Z_{Fase} = \begin{bmatrix} 0,0802 + 0,4708i & 0,0380 + 0,2922i & 0,0380 + 0,2922i \\ 0,0380 + 0,2922i & 0,0802 + 0,4708i & 0,0380 + 0,2922i \\ 0,0380 + 0,2922i & 0,0380 + 0,2922i & 0,0802 + 0,4708i \end{bmatrix} \Omega / Km \quad (4.3)$$

$$Y_{Fase} = \begin{bmatrix} 0,5737i & -0,1278i & -0,1278i \\ -0,1278i & 0,5737i & -0,1278i \\ -0,1278i & -0,1278i & 0,5737i \end{bmatrix} \cdot 10^{-5} \text{ S} / Km \quad (4.4)$$

4.3.3 Outros Sistemas Modelados no ATP – LT-2 e LT-3

Utilizando o ATP foi modelado também um sistema composto, conforme Fig.4.3, o qual é constituído dos seguintes elementos: (i) quatro equivalentes de Thévenin representando os sistemas de potência interligados por duas linhas de transmissão; (ii) as linhas de transmissão representadas por blocos segmentados do modelo de Bergeron disponibilizado pelo ATP; (iii) chaves temporizadas representando o curto-círcito e, (iv) medidores fazendo o papel das UMFs. Utilizando os recursos do ATP, são obtidos valores das tensões e das correntes em ambos os terminais.

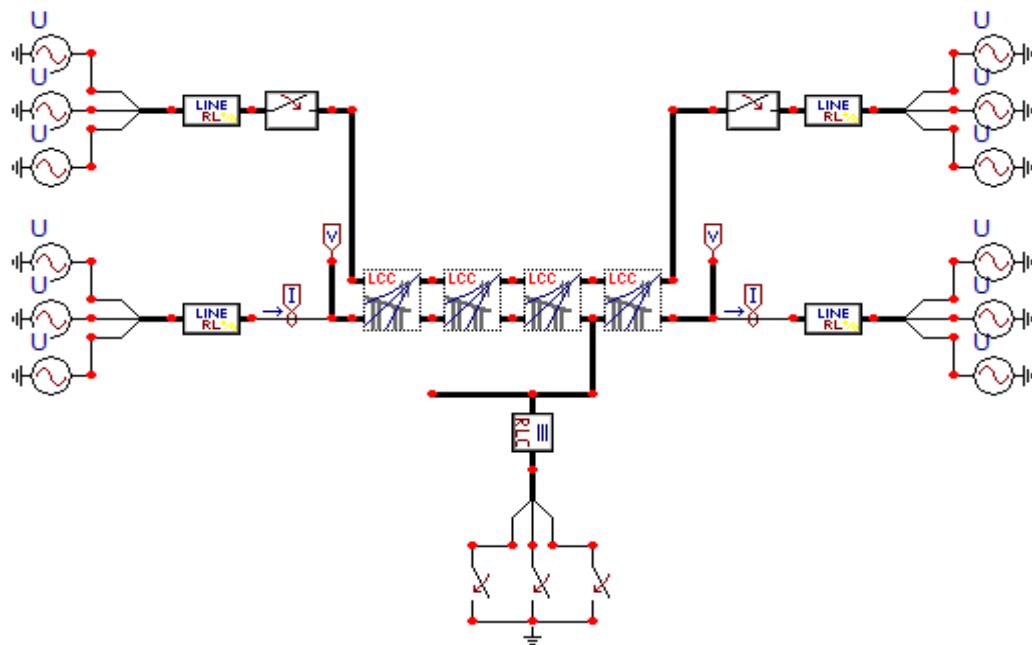


Figura 4.3 –Segundo modelo desenvolvido no ATP

4.3.3.1 Fontes de Alimentação

Os valores das tensões adotados para os equivalente Thévenin nos terminais da linha estão mostradas na Tab. 4.4.

Tabela 4.4 – Tabela de tensões dos equivalentes Thévenin.

Terminal da Linha	Módulo [PU]	Ângulo [°]	Fase A [kV]	Fase B [kV]	Fase C [kV]
Envio - \dot{I}	1	0	$345,000e^{j0^\circ}$	$345,000e^{-j120^\circ}$	$345,000e^{j120^\circ}$
Recepção - \dot{I}	0,942	-5,9	$325,000e^{-j5,9^\circ}$	$325,000e^{-j125,9^\circ}$	$325,000e^{j114,1^\circ}$

4.3.3.2 Elementos de Representação das Faltas

O curto-circuito foi modelado através de chaves temporizadas em série com uma resistência. Os valores utilizados como resistência de falta para esse modelo foram de $0,1\Omega$ e 10Ω . Para um tempo total de simulação de 250 ms todas as faltas ocorrem próximas a 100 ms , sem qualquer alteração do *point-on-wave* de 0 ms . As conexões dos elementos que simulam o curto-circuito foram feitas para faltas a 25%, 50% e 75% do comprimento total da linha, tendo como referência o terminal de recepção (R). Foram simuladas faltas paralelas monofásicas (F-T), trifásicas (3F), fase-fase-terra (F-F-T) e fase-fase (F-F).

4.3.3.3 Linhas de Transmissão Modeladas

Para testes mais abrangentes, foram modeladas 2 (duas) linhas de transmissão diferentes do modelo de referência apresentado, LT-2 e LT-3. Os dados foram obtidos de linhas de transmissão reais do sistema Canadense de 345kV (*EHV Transmission Line Reference Book, 1968*). As tabelas 4.5 e 4.6 resumem os dados das LTs modeladas.

Tabela 4.5 – Tabela de dados geométricos da LT-2 modelada

LINHA DE TRANSMISSÃO – A								
Círculo	CIRCUITO 1				CIRCUITO 2			
Comprimento [km]					345			
Resistividade do Solo [$\Omega \cdot \text{m}$]					1000			
Fase	A	B	C	0	A	B	C	0
Número de Sub-condutores	1	1	1	1	1	1	1	1
Raio dos Sub-condutores [cm]	1,7526	1,7526	1,7526	0,55	1,7526	1,7526	1,7526	0,55
Espaçamento entre Sub-condutores [cm]	---	---	---	---	---	---	---	---
Posição Horizontal [m]	-5,867	-7,696	-5,867	-3,657	5,867	7,696	5,867	3,657
Posição Vertical [m]	19,939	27,254	34,5694	43,586	19,939	27,254	34,5694	43,586
Comprimento da Flecha [m]	5,7912	5,7912	5,7912	5,7912	5,7912	5,7912	5,7912	5,7912
Resistência DC por Sub-condutor [Ω/km]	0,0427	0,0427	0,0427	1,16	0,0427	0,0427	0,0427	1,16

Tabela 4.6 – Tabela de dados geométricos das LT-3 modelada

LINHA DE TRANSMISSÃO – B								
Círculo	CIRCUITO 1				CIRCUITO 2			
Comprimento [km]					387			
Resistividade do Solo [$\Omega \cdot \text{m}$]					1000			
Fase	A	B	C	0	A	B	C	0
Número de Sub-condutores	2	2	2	1	2	2	2	1
Raio dos Sub-condutores [cm]	1,2573	1,2573	1,2573	0,489	1,2573	1,2573	1,2573	0,489
Espaçamento entre Sub-condutores [cm]	45,72	45,72	45,72	---	45,72	45,72	45,72	---
Posição Horizontal [m]	-12,01	-8,179	-4,369	-5,715	12,01	8,179	4,369	5,715
Posição Vertical [m]	16,281	19,901	16,281	22,394	16,281	19,901	16,281	22,394
Comprimento da Flecha [m]	6,7056	6,7056	6,7056	7,467	6,7056	6,7056	6,7056	7,467
Resistência DC por Sub-condutor [Ω/km]	0,0876	0,0876	0,0876	1,463	0,0876	0,0876	0,0876	1,463

4.4 Considerações Finais

No próximo capítulo serão apresentados os testes realizados para o desenvolvimento do método proposto. Tais testes utilizarão apenas o modelo referência criado no ATP na condição transposta e não transposta. Após realização dos testes e a apresentação do método proposto, serão utilizados também os outros modelos desenvolvidos no ATP para avaliar o desempenho do mesmo frente a varias condições de falta, assim como variações dos parâmetros das LTs.

Capítulo 5

Implementação do Método

5.1 Considerações Iniciais

Equation Chapter 5 Section 1

Conforme dito anteriormente, a idéia é desenvolver um método otimizado para localização de faltas em linhas de transmissão não transpostas e/ou desbalanceadas. O método foi desenvolvido, tomando como base algumas premissas e testes iniciais, conforme será mostrado. A busca pelo desacoplamento modal do sistema é o principal objetivo do método. Uma vez encontrado tal desacoplamento, faz-se uso do algoritmo desenvolvido por Joe-Air Jiang (2000), resultando assim em uma razoável melhoria na estimativa dos locais de ocorrência das faltas simuladas.

5.2 Motivação para Proposta

Durante a pesquisa sobre localização de faltas em linhas de transmissão, deparou-se com o método propostos por Joe Air Jiang (2000). Este método utiliza medição fasorial sincronizada e as equações de Bergeron. Resultados demonstram que o método trabalha muito bem para diferentes tipos de falta em diferentes linhas de transmissão, porém é deficiente quando aplicado em LTs não transpostas ou desbalanceadas.

Sabendo-se que tal algoritmo é baseado nas condições de contorno das equações de Bergeron e que tais equações tratam do comportamento de ondas em guia de onda sem influências externas (mútuas), pode-se, a princípio, concluir que o mesmo somente apresentará resultados corretos quando corretas matrizes de desacoplamento modal forem usadas.

Baseado nesta premissa, algumas investigações foram realizadas, tendo em vista a capacidade de acerto do método de Joe Air para uma linha de transmissão não transposta adotada para tal finalidade.

Para testar a suposição anteriormente mencionada, utilizou-se a teoria de autovalores e autovetores para encontrar a correta transformação modal capaz de desacoplar totalmente as matrizes de LTs na condição não transposta. Ao substituir a matriz de transformação modal clássica (normalmente usada nas análises desta natureza) pelas matrizes obtidas com a teoria dos autovalores e autovetores, os resultados de localização de faltas monofásicas modeladas para várias possibilidades (pontos de falta, resistências de falta e resistividade de solo), que antes apresentavam grandes erros, conforme Fig. 5.1, passaram a apresentar bons

resultados de acordo com a Fig. 5.2. Esta constatação permitiu então o desenvolvimento do que se apresenta na sequência deste texto.

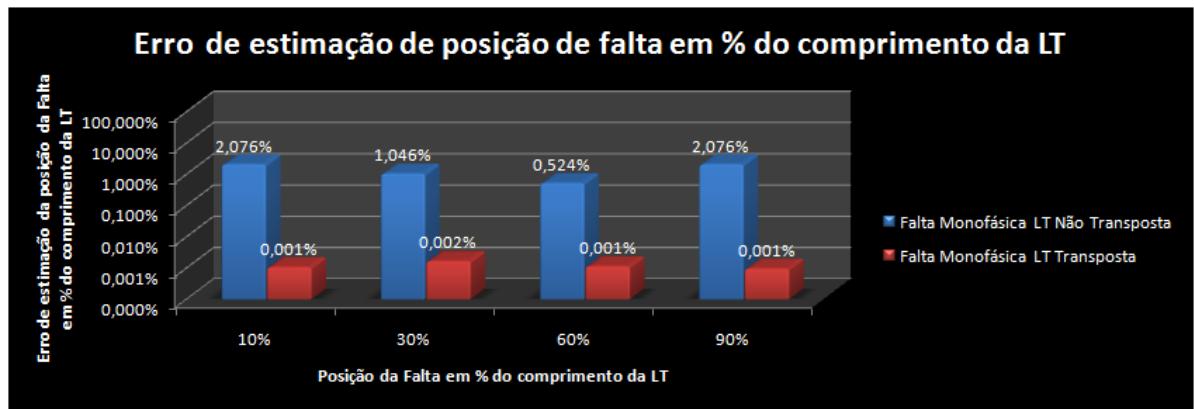


Figura 5.1 – Média de erros de localização de faltas monofásicas de vários casos em linhas não transpostas utilizando desacoplamento modal através de matrizes de transformação de Clarke

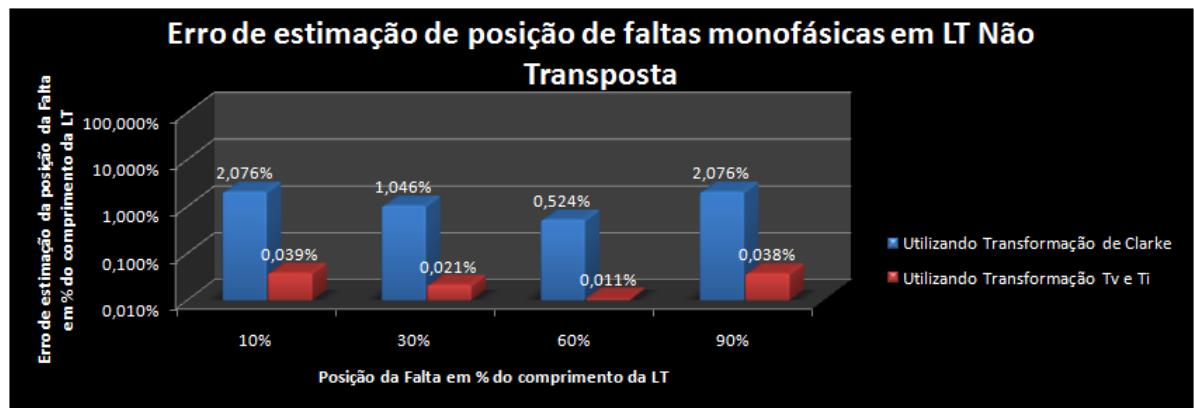


Figura 5.2 – Resultado de localização de faltas monofásicas em linhas não transpostas utilizando desacoplamento modal através de Clarke e a teoria de autovalores e autovetores

O grande inconveniente do método de localização de falta utilizando a correta transformação modal é a necessidade das informações precisas das matrizes de impedância e de admitância da linha de transmissão. Tais informações são normalmente obtidas usando de cálculos baseados nos dados da geometria das linhas de transmissão, assim como é feito pelas rotinas *LCC* do ATP ou outras rotinas em uso em outros programas. Como na prática, uma LT em funcionamento possui uma dinâmica própria, as informações precisas sobre Z_{Fase} e Y_{Fase} sempre foram difíceis de serem constatadas e/ou validadas.

Dessa forma, os resultados encontrados na pesquisa e o inconveniente conhecimento prévio das matrizes de impedância e de admitância fomentaram a possibilidade de se desenvolver um método onde se buscava a correta transformação modal, garantindo o desacoplamento do sistema e consequentemente a correta localização da falta. Tal tarefa

pode ser implementada a partir de medições das tensões e das correntes, ambas sincronizadas nos extremos da LT, e o conhecimento prévio do projeto da linha de transmissão.

5.3 Primeiro Teste Realizado

Como o algoritmo de Joe Air é baseado nas condições de contorno das equações de Bergeron, são estas na realidade que sofrerão as modificações com o desacoplamento modal, de modo que o método funcione corretamente.

Considerando que a obtenção das matrizes Tv e Ti passa necessariamente pelo conhecimento das matrizes de impedância e admitância da LT, um primeiro teste foi realizado, conforme mostra o diagrama da Fig. 5.3.

O processo é iniciado com os valores medidos (simulados) dos sincrofatores de tensão e de corrente (V_s , I_s , V_r e I_r), e com as matrizes Z_i e Y_i obtidas por simulação do modelo referência no ATP (seção 4.3.2) nas condições transposta e não-transposta. As matrizes Z_i e Y_i , aqui denominadas de matrizes inicialmente inseridas no processo, nada mais são do que as matrizes Z_{Fase} Y_{Fase} .

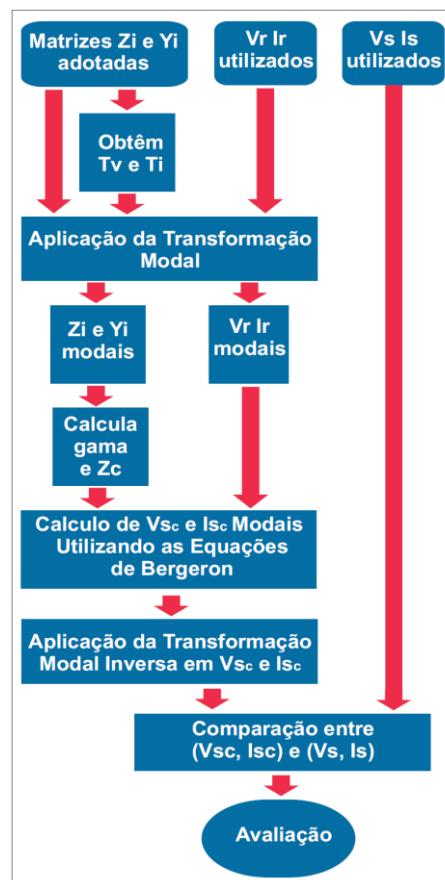


Figura 5.3 – Representação do diagrama de blocos utilizado no teste

O primeiro passo do processo é o cálculo das matrizes de transformação Tv e Ti , através da teoria dos autovalores e autovetores, baseado nas matrizes de fase inicialmente inseridas. As matrizes de impedância e admitância modais são obtidas conforme descrito na seção 3.3.2, assim como as tensões e correntes modais do terminal de recepção da LT.

Em seguida, são calculados o coeficiente de propagação e a impedância característica modais usando as Eqs. (3.9) e (3.10). Obtidos os valores modais necessários para as equações de Bergeron, Eqs. (3.21) e (3.22), os valores das tensões e das correntes no domínio modal do terminal de envio são calculados. A transformação modal inversa desses valores resulta nas tensões e correntes, no domínio de fase, no terminal de envio. Estes fasores de tensão e de corrente calculados (\dot{V} e \dot{I}) são então comparados com as tensões e correntes do lado de envio, obtidas da simulação (ATP). Na realidade, calcula-se um fator de erro relativo percentual, dado pela equação (5.1), o qual irá indicar a proximidade ou o afastamento entre as grandezas calculadas e as medidas (ou simuladas), dadas as matrizes de impedância e admitância.

$$Erro = 100 \cdot \left\{ \frac{\left| \dot{V} sc_a - \dot{V} s_a \right|}{\left| \dot{V} s_a \right|} + \frac{\left| \dot{V} sc_b - \dot{V} s_b \right|}{\left| \dot{V} s_b \right|} + \frac{\left| \dot{V} sc_c - \dot{V} s_c \right|}{\left| \dot{V} s_c \right|} + \frac{\left| \dot{I} sc_a - \dot{I} s_a \right|}{\left| \dot{I} s_a \right|} + \frac{\left| \dot{I} sc_b - \dot{I} s_b \right|}{\left| \dot{I} s_b \right|} + \frac{\left| \dot{I} sc_c - \dot{I} s_c \right|}{\left| \dot{I} s_c \right|} \right\} \% \quad (5.1)$$

onde:

$\dot{V} sc_{a,b,c}$ e $\dot{V} s_{a,b,c}$ são fasores de tensão das fases A, B e C no terminal de envio (S) calculados e medidos, respectivamente;

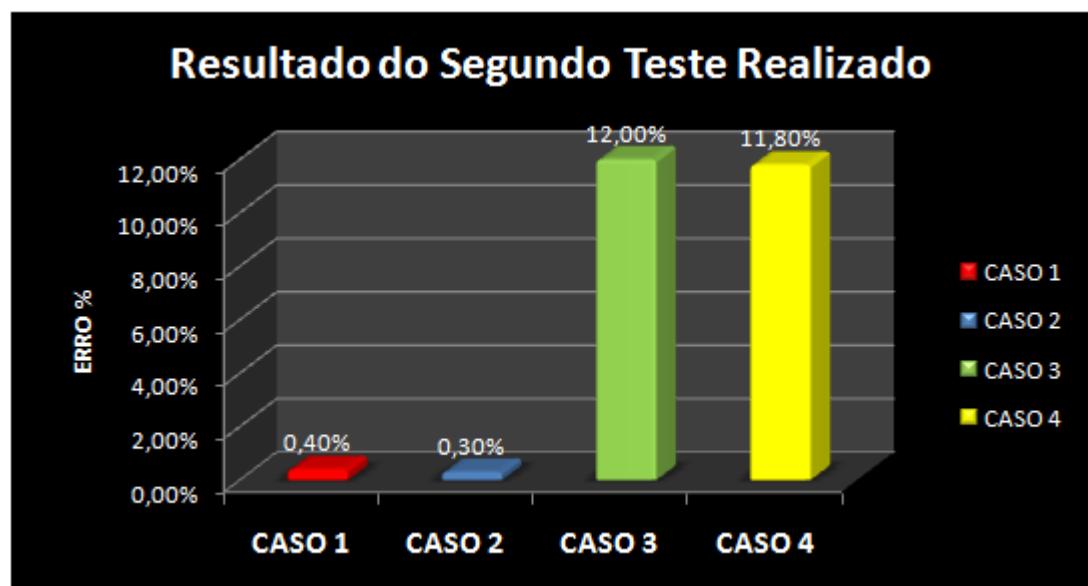
$\dot{I} sc_{a,b,c}$ e $\dot{I} s_{a,b,c}$ são fasores de corrente das fases A, B e C no terminal de envio (S) calculados e medidos, respectivamente;

Através deste teste, foram avaliadas as relações entre os sincrofasores de tensão e corrente e as matrizes de impedância e admitância da LT obtidos da simulação no ATP. Para tal, foram realizados 4 (quatro) casos para análise qualitativa do processo conforme tabela 5.1:

Tabela 5.1 – Testes realizados no diagrama de bloco da Fig. 5.3

	\dot{V} e \dot{I} utilizados da LT na condição:	Z_{Fase} e Y_{Fase} utilizados da LT na condição:
CASO 1	TRANSPOSTA	TRANSPOSTA
CASO 2	NÃO TRANSPOSTA	NÃO TRANSPOSTA
CASO 3	TRANSPOSTA	NÃO TRANSPOSTA
CASO 4	NÃO TRANSPOSTA	TRANSPOSTA

Com as simulações, pode-se observar na Fig. 5.4 os erros encontrados, para cada um dos casos. Como já era esperado, os erros maiores acontecem para os casos 3 e 4.

**Figura 5.4 – Resultado dos erros para os quatro casos testados**

Para fins ilustrativos, a Fig. 5.5 apresenta, no plano complexo, as diferenças entre os fasores calculados e medidos, em cada fase.

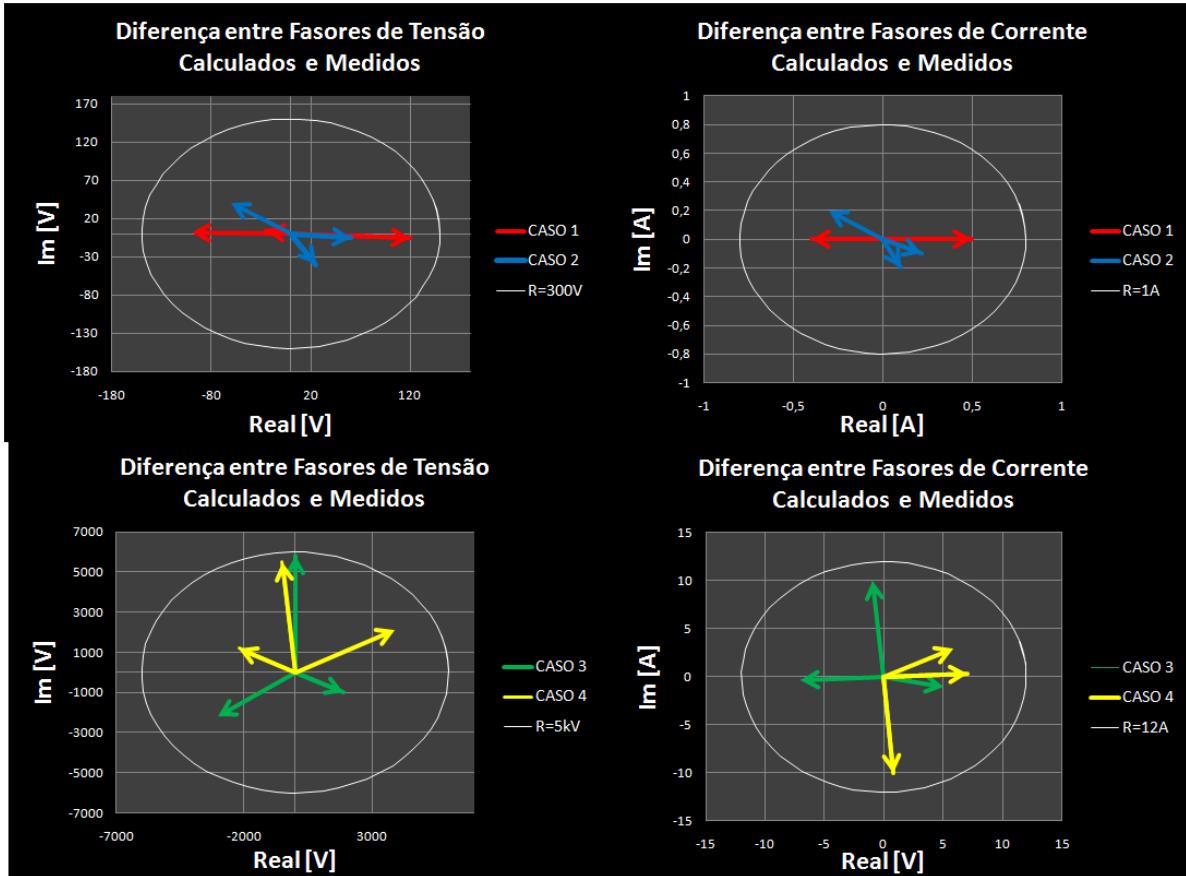


Figura 5.5 – Diferença fasorial entre os fasores calculados e medidos (simulados)

Ao avaliar os resultados apresentados, fica claro o sucesso qualitativo do teste, onde se pode verificar a direta relação entre os sincrofatores utilizados e as matrizes adotadas. Para os casos 1 e 2 onde foram usadas as matrizes de impedância e de admitância da LT correspondentes aos sincrofatores medidos, os valores calculados foram muito próximos aos valores medidos. Entretanto, para os casos 3 e 4, onde as matrizes não correspondiam aos sincrofatores utilizados, os erros foram elevados.

Embora tais resultados possam ser intuitivos, tal constatação ajudou a entender as relações entre os sincrofatores e as matrizes Z_{Fase} e Y_{Fase} usadas. A partir de então, buscou-se a realização de um número maior de testes, de modo a avaliar o quanto a variável “Erro” do processo criado é dependente dos erros aleatórios inseridos nos elementos das corretas matrizes de impedância e de admitância da LT.

Para os novos testes, procurou-se introduzir alterações aleatórias nas matrizes Z_{Fase} e Y_{Fase} . Assim, foram criados quatro 4 grupos de testes, sendo que para cada grupo foram realizados 1000 testes considerando o caráter aleatório do processo. Cada grupo de teste correspondeu a certo grau de erro aleatório inserido em cada elemento das matrizes adotadas

como referência (obtidas no ATP). Estas alterações aleatórias foram feitas em diferentes algarismos significativos de cada elemento das matrizes Z_{Fase} e Y_{Fase} de acordo com cada grupo, ou seja:

Grupo 1 – Alterações no algarismo mais significativo;

Grupo 2 - Alterações no segundo algarismo mais significativo;

Grupo 3 - Alterações no terceiro algarismo mais significativo;

Grupo 4 - Alterações no quarto algarismo mais significativo.

Procedendo desta maneira com a totalidade de testes executados, pôde-se verificar o comportamento da variável "Erro" (5.1), conforme resumido nas Figs. 5.6 e 5.7. Em tais figuras, os valores médios, os desvios médios, os valores mínimos e máximos da variável "Erro" para cada grupo de teste são mostrados. De modo complementar (Fig. 5.7), é mostrado um conjunto de gráficos com pontos no plano complexo que representam o resultado da diferença fasorial entre os fasores medidos e calculados.

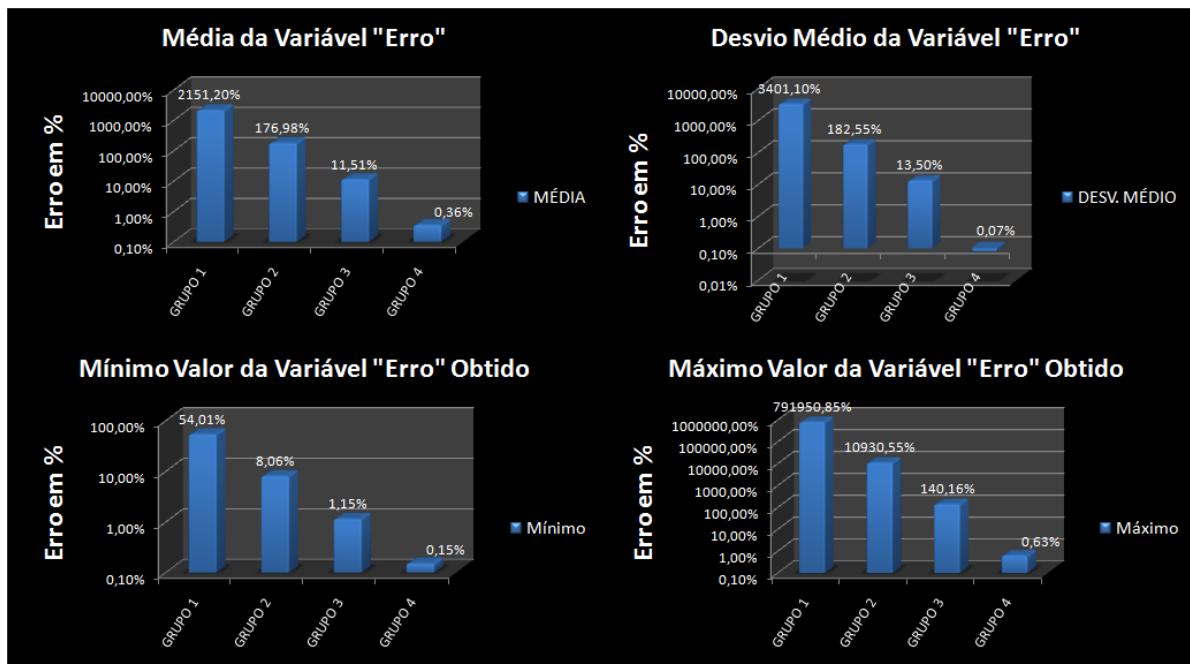


Figura 5.6 – Resultados da variável “Erro” em % para cada grupo de teste

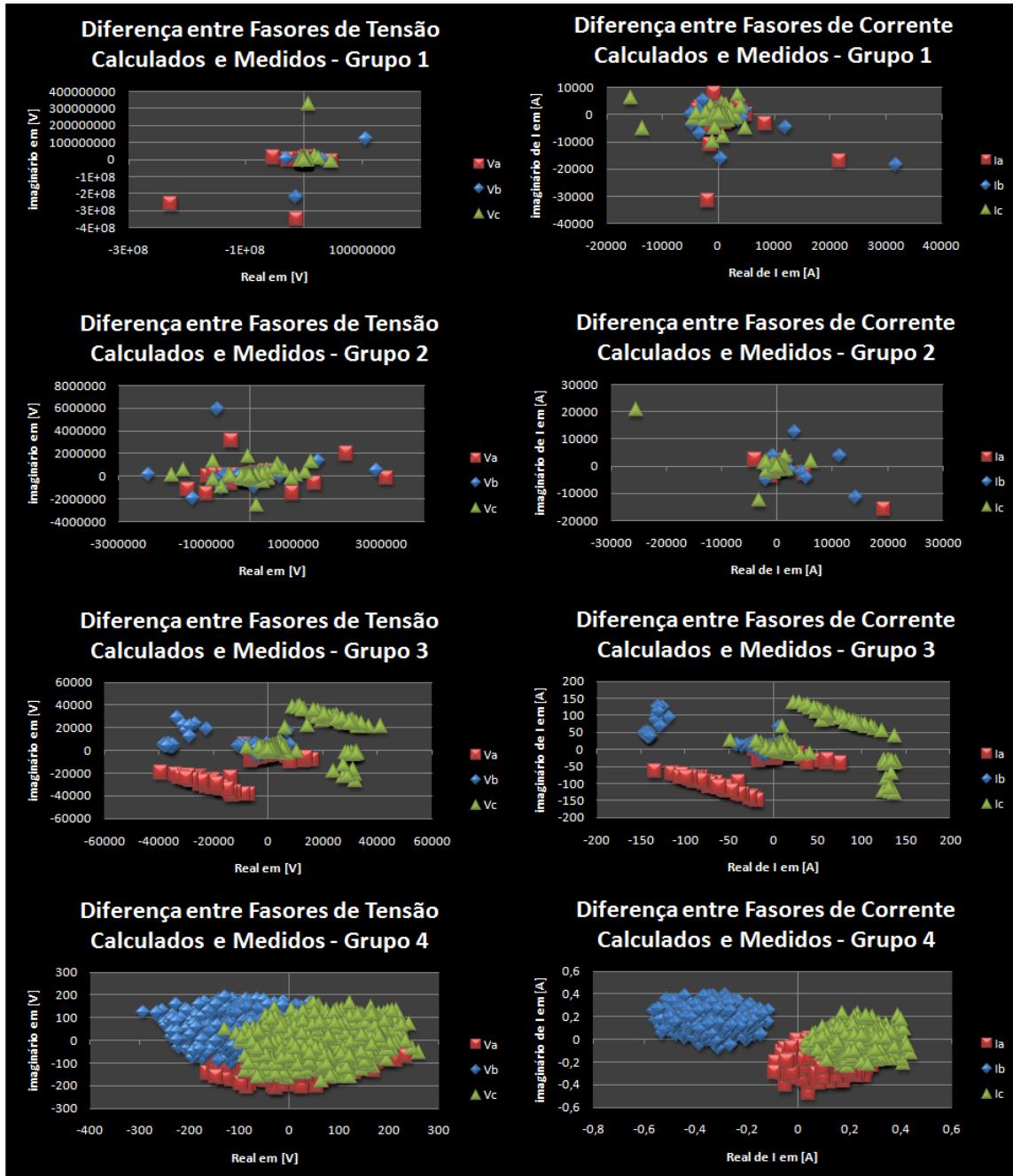


Figura 5.7 – Resultado da diferença fasorial entre valores calculados e medidos

Os resultados apresentaram erros proporcionais aos erros inseridos nas corretas matrizes de impedância e admitância da LT utilizada. As variações nos algarismos mais significativos das matrizes proporcionaram grandes valores para a variável “Erro”, assim como grandes diferenças entre os fasores medidos e calculados. O “Erro” obtido ao inserir erros no algarismo menos significativo das matrizes foi muito baixo, indicando o correto funcionamento das equações de Bergeron quando o sistema está desacoplado.

Estes testes foram conclusivos para confirmar uma relação dependente da variável “Erro” com as matrizes Z_{Fase} e Y_{Fase} , corretamente relacionadas ou não aos sincrofasores

utilizados como entrada do processo criado. Dessa forma, criou-se uma forma de avaliar se as matrizes Z_{Fase} e Y_{Fase} correspondem ou não aos sincrofatores medidos.

O próximo passo foi criar então um método de busca otimizado capaz de encontrar matrizes de impedância e admitância capazes de fornecerem as matrizes Tv e Ti que desacoplam a LT utilizando os sincrofatores medidos e uma otimização do processo via algoritmos genéticos, conforme será mostrado.

5.4 Método Proposto de Localização de Faltas

Inicialmente a idéia foi utilizar um conjunto de matrizes com valores aleatórios dentro de uma faixa coerente, avaliá-las e ordená-las selecionando aquelas que corresponderiam ao menor erro entre as tensões e correntes medidas e calculadas no terminal de envio.

No entanto, buscar uma matriz correta simplesmente por tentativa e erro é algo absolutamente inviável, tendo um enorme espaço de busca, considerando que cada tentativa de acerto ou erro é composta por um conjunto de 18 variáveis, conforme representado na Fig. 5.8.

$$Z = \begin{bmatrix} 01+j07 & 04+j10 & 05+j11 \\ 04+j10 & 02+j08 & 06+j12 \\ 05+j11 & 06+j12 & 03+j09 \end{bmatrix} \quad Y = \begin{bmatrix} j13 & j16 & j17 \\ j16 & j14 & j18 \\ j17 & j18 & j15 \end{bmatrix}$$

Figura 5.8 – Representação do conjunto de variáveis das matrizes Z e Y

Assim sendo, para tentar otimizar o processo passou-se a utilizar a técnica de algoritmos genéticos.

Basicamente, o algoritmo genético será o responsável por selecionar apenas os conjuntos de matrizes com o melhor resultado na comparação entre as tensões e as correntes calculadas e medidas no terminal de envio da LT. Na sequência, faz-se modificações nos conjuntos de matrizes usando os operadores de cruzamento e/ou mutação ao longo das gerações. O resultado final esperado é a seleção de um “grupo evoluído”, caracterizando um conjunto de matrizes capazes de possibilitar o desacoplamento do sistema e consequentemente a correta localização de falta.

Para a melhor compreensão do algoritmo genético, segue algumas definições adotadas:

Indivíduo: Representa o conjunto de variáveis (*string*) que compõem as matrizes de impedância e admitância como apresentado na Fig. 5.9;

$$\text{Indivíduo} = [01 \ 02 \ 03 \ 04 \ 05 \ 06 \ 07 \ 08 \ 09 \ 10 \ 11 \ 12 \ 13 \ 14 \ 15 \ 16 \ 17 \ 18]$$

Figura 5.9 – Representação do indivíduo das matrizes Z e Y

População: Conjunto de indivíduos de uma geração;

Geração: Representação temporal da evolução das populações. Registra o número de sucessivas alterações da população;

Cruzamento: Forma de combinar os indivíduos de uma geração para obter uma prole. Onde os indivíduos são divididos em seis partes simétricas e suas partes combinadas com outros indivíduos aleatoriamente na chamada piscina de cruzamento;

Prole: Indivíduos resultantes do cruzamento da população. São avaliados e comparados junto a todos os indivíduos na busca pelos mais evoluídos que comporão a população da futura geração;

Mutação: Alteração aleatória de uma ou mais variáveis de alguns indivíduos. Neste trabalho foram utilizados três tipos de mutação, a mutação total do indivíduo, onde todos os elementos são aleatoriamente alterados; a mutação singular, onde apenas um elemento do indivíduo é aleatoriamente alterado e a mutação singular dos indivíduos com maior índice de aptidão, onde o código genético dos indivíduos mais fortes são copiados com mutações singulares criando assim filhos mutantes;

Função de Avaliação: Função responsável por avaliar o grau de evolução de cada indivíduo. Para o caso da aplicação apresentada, a função de avaliação passa ser todo o processo criado conforme a Fig. 5.3, onde as diferenças entre os fasores de tensão e de corrente medidos e calculados resultam num determinado valor chamado grau de aptidão do indivíduo;

Evolução: Avaliação dos indivíduos da população ao longo das gerações. Busca-se obter o maior grau de aptidão possível, sendo que o critério de parada do algoritmo genético pode ser ajustado pelo o número de gerações ou pelo grau de aptidão de determinado indivíduo.

Para este trabalho, foi utilizado como base um algoritmo genético não convencional, denominado CHC (ver seção 3.4.1), cuja representação gráfica de funcionamento do mesmo está apresentada na Fig. 5.10.

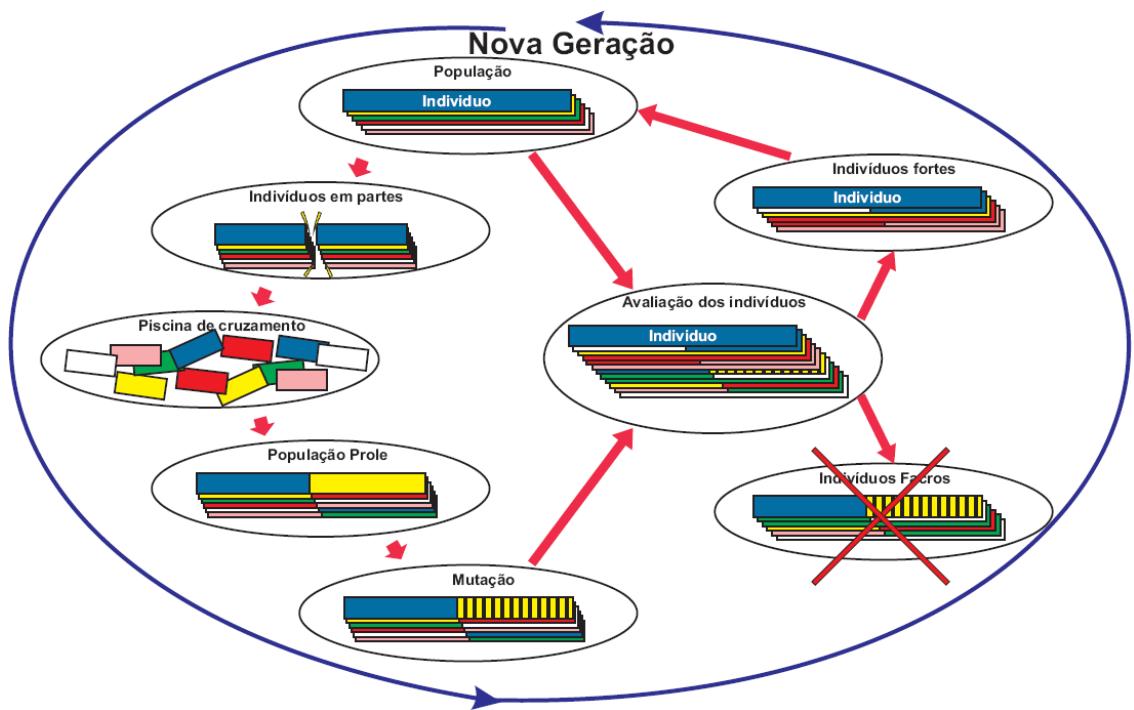


Figura 5.10 – Representação do algoritmo genético para otimização do método de tentativas de acerto e erro.

Inicialmente, os indivíduos são aleatoriamente gerados para formar uma população pioneira, compondo as matrizes Z e Y da LT. Na realidade, esta população inicial pode ser “semeada” considerando algum conhecimento prévio da linha de transmissão. Posteriormente, alguns indivíduos são selecionados através de um processo baseado na função de avaliação (*fitness-based process*), obtendo-se o grau de aptidão de cada indivíduo. Após esta etapa, uma nova população de uma nova geração é criada usando os operadores cruzamento e de mutação, conforme Fig. 5.11.

O diagrama mostra o processo de criação de novos indivíduos a partir de uma população inicial.
 1. **População Inicial:** Consiste em 6 indivíduos de 18 genes cada, todos coloridos de forma diferente (azul, amarelo, verde, rosa).
 2. **Cruzamento:** Indicado por uma seta apontando para baixo, mostra a combinação de genes entre os indivíduos da população inicial para gerar novos filhos.
 3. **Mutação:** Indicado por uma seta apontando para baixo, mostra a alteração aleatória de genes em um dos novos indivíduos gerados.
 4. **Novos Indivíduos:** Mostra 6 novos indivíduos gerados, que são resultado da combinação e das mutações aplicadas ao crossover.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18

Figura 5.11 – Criação de novos indivíduos através de cruzamentos e mutações

Todos os indivíduos são avaliados e classificados, sendo que somente os indivíduos que apresentam o melhor grau de aptidão (*fitness*) são selecionados para a próxima geração, iniciando assim um processo cíclico de reprodução e seleção. Geralmente o valor médio do grau de aptidão irá aumentar através deste processo, uma vez que somente os melhores da geração serão escolhidos.

Estabelecido um critério de parada, após algumas gerações, o processo resultará em um par de matrizes Z_{Fase} e Y_{Fase} , as quais, com grande probabilidade, corresponderão às matrizes Z_{Fase} e Y_{Fase} capazes de proporcionar as matrizes T_v e T_i que desacoplam a LT.

A função de avaliação é baseada nas equações de Bergeron, usando os fasores medidos e calculados no terminal de envio da linha de transmissão, conforme está apresentado no diagrama da Fig. 5.12. Para cada indivíduo da população são formadas as respectivas matrizes Z_{Fase} e Y_{Fase} e, a partir destas, as matrizes de transformação T_v e T_i .

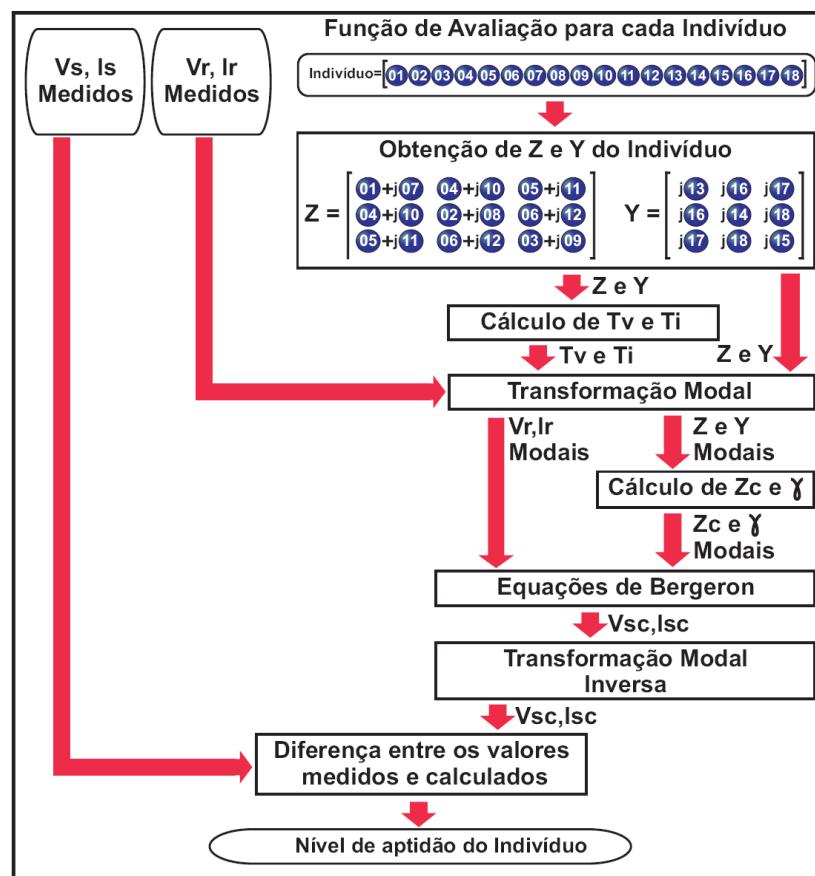


Figura 5.12. - Algoritmo proposto para o cálculo do nível de aptidão (*Fitness Level*)

Todas as grandezas de tensão e de corrente, medidas no terminal de recepção, assim como Z_{Fase} e Y_{Fase} , são transformadas para o domínio modal através de T_v e T_i . No

domínio modal, são calculadas as impedâncias características modais (Zc_i) e os coeficientes de propagação modais (γ_i), conforme equações (5.2) e (5.3).

$$Zc_i = \sqrt{Z_{\text{mod}i}/Y_{\text{mod}i}} \quad (5.2)$$

$$\gamma_i = \sqrt{Z_{\text{mod}i} \cdot Y_{\text{mod}i}} \quad (5.3)$$

Onde:

i é índice dos modos 0,1 e 2.

As tensões e correntes modais do terminal de recepção ($Vr_i; Ir_i$), juntamente com Zc_i e γ_i , são utilizadas nas equações (5.4) e (5.5), com as quais resultarão nos valores calculados de tensão e de corrente modais do terminal de envio ($Vsc_i; Isc_i$).

$$Vsc_i = Vr_i \cdot \cosh(\gamma_i \cdot l) - Ir_i \cdot Zc_i \cdot \sinh(\gamma_i \cdot l) \quad (5.4)$$

$$Isc_i = -Ir_i \cdot \cosh(\gamma_i \cdot l) + \left(\frac{Vr_i}{Zc_i} \right) \cdot \sinh(\gamma_i \cdot l) \quad (5.5)$$

onde:

Vsc_i e Isc_i são fasores de tensão e corrente modais calculados do terminal de Envio (S);

Vr_i e Ir_i são fasores de tensão e corrente modais medidos no terminal de Recepção (R);

Zc_i e γ_i são os valores estimados da Impedância Característica e Coeficiente de Propagação (Gama) modais, respectivamente;

l é o comprimento total da linha de transmissão;

i o índice dos modos de propagação 0, 1 e 2.

O grau de aptidão do indivíduo é calculado conforme equação (5.6), sendo usados os respectivos valores calculados e medidos ($Vsc_i; Isc_i$ e $Vs_i; Is_i$) para se calcular os erros de tensão (Ev) e de corrente (Ec) conforme equações (5.7) e (5.8), finalizando assim o processo de avaliação.

$$Grau_de_Aptidão = \frac{1}{E_v + E_c} \quad (5.6)$$

sendo:

$$E_v = \frac{\left| \dot{V}_{sc_0} - \dot{V}_{s_0} \right|}{\left| \dot{V}_{s_0} \right|} + \frac{\left| \dot{V}_{sc_1} - \dot{V}_{s_1} \right|}{\left| \dot{V}_{s_1} \right|} + \frac{\left| \dot{V}_{sc_2} - \dot{V}_{s_2} \right|}{\left| \dot{V}_{s_2} \right|} \quad (5.7)$$

$$E_c = \frac{\left| \dot{I}_{sc_0} - \dot{I}_{s_0} \right|}{\left| \dot{I}_{s_0} \right|} + \frac{\left| \dot{I}_{sc_1} - \dot{I}_{s_1} \right|}{\left| \dot{I}_{s_1} \right|} + \frac{\left| \dot{I}_{sc_2} - \dot{I}_{s_2} \right|}{\left| \dot{I}_{s_2} \right|} \quad (5.8)$$

Com o processo então otimizado, aplica-se as tensões e as correntes medidas e desacopladas através de T_v e T_i resultantes do processo de busca. É certo que ao garantir o desacoplamento de todas as variáveis necessárias para a localização de falta, o algoritmo irá apresentar boa exatidão para qualquer tipo de falta em qualquer tipo de linha de transmissão.

O método consiste no cálculo de x (distância da falta em relação ao terminal de recepção), conforme figura 5.13 e equação (5.9):

$$x = Dl \quad (5.9)$$

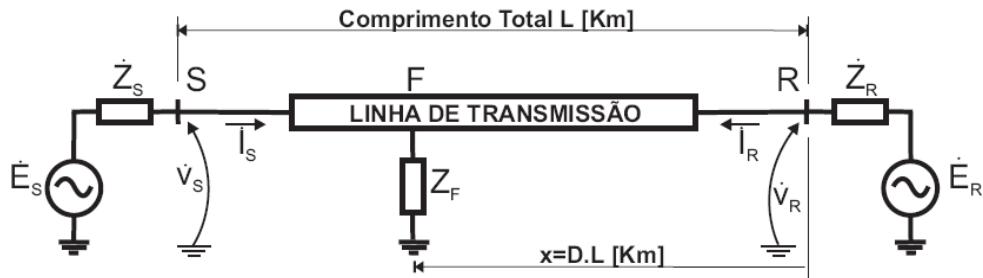


Figura 5.13 - Sistema adotado para a localização de falta

Todo o procedimento para o cálculo de D da falta é realizado através das formulações (2.3) a (2.10) apresentadas na seção 2.3.2.2

5.5 Parametrização do algoritmo genético

Buscou-se, através de alguns testes utilizando os dados das simulações da LT de referência, modelada no ATP na condição não transposta, obter a melhor configuração para que o algoritmo genético de busca das matrizes Z e Y tivesse um bom desempenho em

termos de resultado e tempo de convergência. Para tal, o tamanho da população, os fatores de mutação, o critério de parada e a população pioneira foram avaliados.

5.5.1 Tamanho da população de indivíduos

Para avaliar o desempenho do algoritmo genético frente ao tamanho da população de indivíduos, registrou-se o grau de aptidão e o tempo de 5 simulações consecutivas. O tamanho da população foi alterado de 10 a 300 indivíduos e todos os outros parâmetros foram mantidos iguais. A relação entre o nível de aptidão alcançado e o tempo gasto para tal ($p = \text{nível de aptidão} / \text{tempo}$) define o desempenho do algoritmo para cada tamanho de população conforme Fig. 5.14.

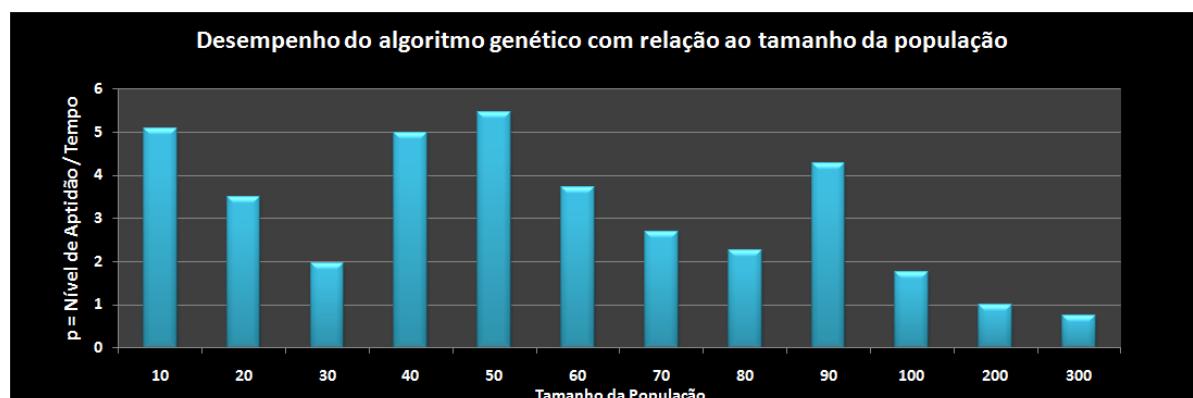


Figura 5.14– Desempenho do algoritmo genético com relação ao tamanho da população adotada

Confirmando uma característica do algoritmo genético CHC, os melhores desempenhos foram obtidos para populações menores que 100 indivíduos. Assim, para todas as simulações realizadas neste trabalho foram adotadas populações de 50 indivíduos.

5.5.2 Fatores de Mutação

O algoritmo genético CHC adotado tem como característica uma busca mais agressiva e para solucionar o problema de convergência prematura para mínimos locais é utilizada uma alta taxa de mutação, sempre preservando o melhor indivíduo da população.

A mutação total se faz necessária para manter, ao longo das gerações, a variedade genética das populações. A mutação singular, como na biologia, proporciona significante evolução de indivíduos através de alterações genéticas singulares. A mutação singular de indivíduos mais fortes otimiza o processo de mutação singular, onde o código genético com

maior índice de aptidão é copiado com alguma alteração, aumentando assim a probabilidade de evolução.

Os melhores índices ($p = \text{Nível de Aptidão} / \text{tempo}$) para os três fatores de mutação foram obtidos através de avaliações independentes de desempenho, com variações de cada fator de mutação conforme Figuras 5.15 a 5.17. Foram realizadas 10 simulações consecutivas para cada valor testado e os valores dos fatores de mutação variaram de 10% a 100% do tamanho da população. Todos os outros parâmetros do algoritmo genético foram mantidos constantes.

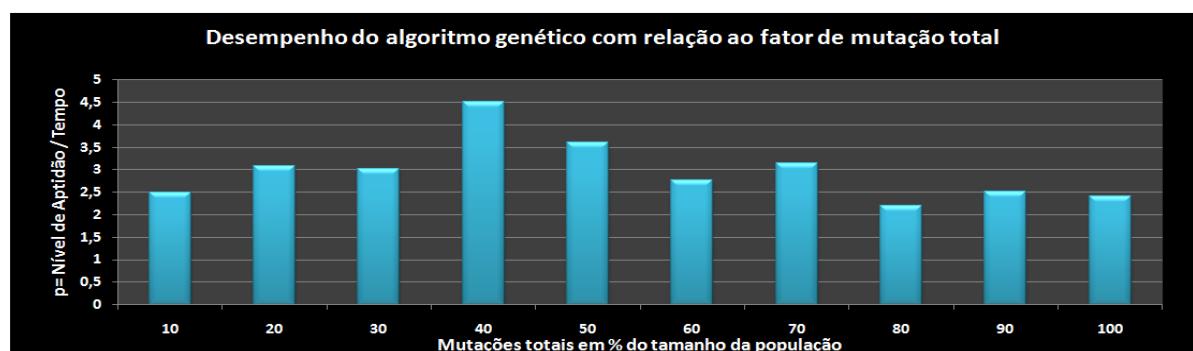


Figura 5.15 – Desempenho do algoritmo genético com relação ao fator de mutações totais

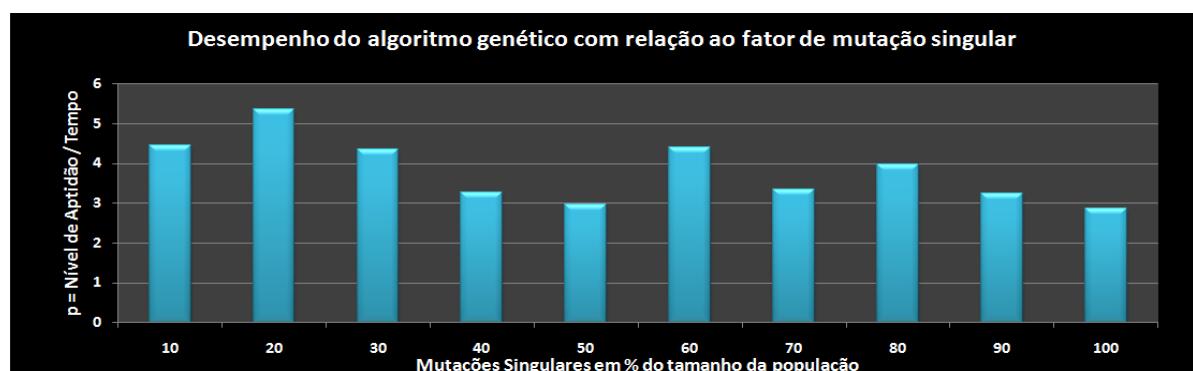


Figura 5.16 – Desempenho do algoritmo genético com relação ao fator de mutações singulares

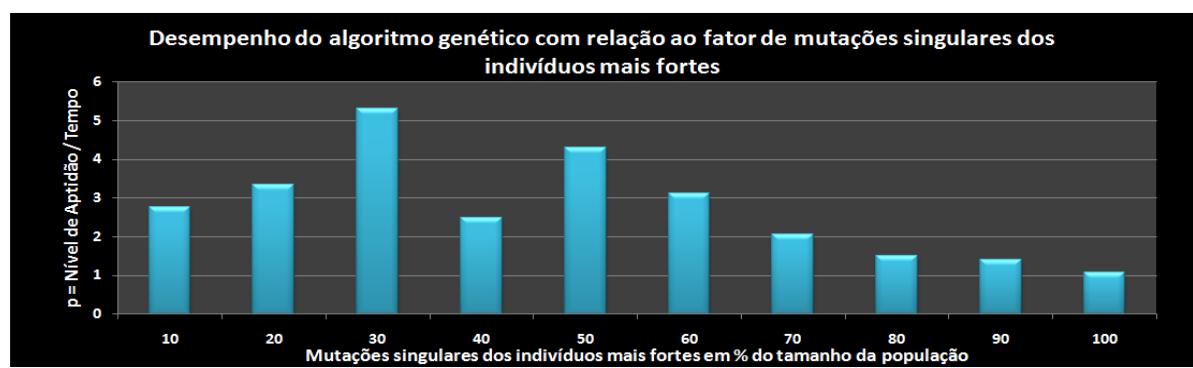


Figura 5.17 – Desempenho do algoritmo genético com relação ao fator de mutações singulares dos indivíduos mais fortes

Os melhores desempenhos do algoritmo apresentados nas Figs. 5.15 a 5.17 definiram os fatores de mutação para todas as simulações deste trabalho:

- Mutação Total: 40%
- Mutação Singular: 20%
- Mutação Singular de Indivíduos mais Forte: 30%

Utilizando a combinação dos fatores acima, a mutação é capaz de aumentar significativamente o desempenho do algoritmo genético, não apenas na taxa de evolução, mas também nos valores máximos do grau de aptidão.

5.5.3 Critério de Parada

A definição do critério de parada é de grande importância para o bom desempenho do algoritmo genético. Busca-se conciliar pouco tempo de simulação e elevado grau de aptidão. Ao limitar o tempo de simulação a um curto período de tempo, um elevado grau de aptidão do indivíduo mais forte não é alcançado. Assim como, ao buscar um elevado grau de aptidão, muito tempo de simulação é requerido. Após algumas simulações em computadores pessoais, constatou-se que o tempo médio de 17 segundos era suficiente para obter o grau de aptidão necessário para o sucesso do método. O tempo de simulação de 17 segundos corresponde a 1000 gerações de indivíduos ao longo da simulação, sendo esse adotado como o critério de parada do algoritmo genético.

5.5.4 População Pioneira

Para otimizar o desempenho de qualquer algoritmo genético, tenta-se sempre limitar o espaço de busca. Para isso, a definição da população pioneira ou ponto de partida é de grande importância. Para o algoritmo genético do método desenvolvido são utilizadas, como ponto de partida, as informações das matrizes de impedância e de admitância obtidas através do projeto da LT. Sabe-se que na prática os parâmetros de projeto não correspondem fielmente aos parâmetros reais da LT após sua construção, entretanto são as informações mais próximas dos reais parâmetros da LT, mesmo após possíveis variações ao longo do tempo.

5.6 Considerações Finais

O método de localização de falta desenvolvido encontra-se funcionando e tem apresentado bons resultados quando rodado em computadores pessoais, usando o Matlab.

Para demonstrar isso, o desempenho do mesmo tem sido testado através de inúmeras simulações. Alguns resultados obtidos estão apresentados no próximo capítulo.

Capítulo 6

Resultados

6.1 Considerações Iniciais

Equation Chapter 6 Section 1

O objetivo deste capítulo é apresentar os resultados obtidos com o método de localização de faltas em linhas não transpostas ou desbalanceadas.

Primeiramente serão apresentados os resultados de localização de falta utilizando o estado da arte em medição fasorial sincronizada. Para isso, todos os modelos de LT apresentados no Cap. 4, tanto na condição transposta, quanto na não transposta, são usados para verificação do algoritmo de Joe Air (Seção 2.3.2.2).

Na sequência, apresenta-se comparações entre os resultados do algoritmo Joe Air Jiang aplicado convencionalmente e com a aplicação do método implementado. Para essas comparações foram apenas simulados os casos onde o algoritmo Joe Air Jiang não foi capaz de apresentar bons resultados de localização de falta.

O final do capítulo mostra outras aplicações avaliando variações na resistividade do solo e nas resistências dos condutores em todos os modelos de LT criados. Busca-se avaliar a localização de faltas utilizando o método implementado frente a reais variações dos parâmetros das LTs ao longo do tempo.

6.2 Resultados de localização de falta utilizando o Algoritmo de Joe Air Jiang

O método de Joe Air, apresentado na seção 2.3.2.2, foi aplicado para resolver o problema da localização de faltas, as quais foram simuladas nas LTs apresentadas na seção 4.3.2, considerando as seguintes características:

- LT na condição transposta e não transposta;
- Faltas Trifásicas (3F), Monofásicas (F-T), Bifásica a Terra (F-F-T) e Bifásica (F-F)
- Posição de ocorrência da falta em 25%, 50% e 75% do comprimento total da LT a partir do terminal de recepção;
- Resistência de falta de 0,1 Ω e 10 Ω

Variáveis do sistema, como o fluxo de potência através da LT e as impedâncias equivalentes das fontes foram mantidas constantes devido a não influência das mesmas no algoritmo testado (Joe Air, 2000).

Os resultados de localização de falta são apresentados através de erros entre os valores calculados e os valores exatos da posição da falta relativos ao comprimento da LT. Sabendo que o resultado da localização de uma falta envolvendo terra é calculado para todos os modos 0 (terra), 1 e 2 (aéreos) e que o modo aéreo 1 é o comumente utilizado, apenas os resultados calculados para o modo aéreo 1 são aqui apresentados. Tais resultados encontram-se nas Figuras. 6.1 a 6.3, onde cada figura corresponde a um modelo de LT criado, denominados LT-1, LT-2 e LT-3, respectivamente. Os gráficos são apresentados em escala logarítmica.



Figura 6.1 – Erro de Localização de Faltas à 25%, 50% e 75% da LT em % do comprimento da LT para a LT-1 modelada na condição transposta e não transposta



Figura 6.2 – Erro de Localização de Faltas à 25%, 50% e 75% da LT em % do comprimento da LT para a LT-2 modelada na condição transposta e não transposta



Figura 6.3 – Erro de Localização de Faltas à 25%, 50% e 75% da LT em % do comprimento da LT para a LT-3 modelada na condição transposta e não transposta

Com os resultados, pode-se verificar que o algoritmo de localização de falta utilizado é capaz de estimar com boa exatidão o ponto de ocorrência de todas as faltas simuladas nas LTs na condição transposta. Os erros obtidos nesta condição foram menores que 0,27%, independentes do tipo da LT, do valor da resistência de falta, do tipo de falta e da posição da mesma. Devido à transposição das LTs, o sistema nessa condição é balanceado. Por esse motivo, a transformação modal através de Clarke é alcançada, proporcionando o correto

funcionamento do algoritmo. Assim, confirma-se o bom desempenho do algoritmo de Joe Air Jiang aplicado em LTs na condição transposta.

Entretanto, para os casos simulados com as LTs na condição não transposta, o menor erro calculado foi de 1,14% do comprimento total da LT. Com exceção das faltas trifásicas que apresentaram erros menores, todos os outros tipos de falta tiveram erros maiores que 2%. De forma geral, observou-se que os erros são menores no centro da LT e aumentam para ocorrências próximas aos terminais da LT chegando a atingir erros de até 46,64%. Para os casos de faltas trifásicas, verificou-se que a resistência de falta influencia no resultado do algoritmo, onde casos de falta no mesmo ponto com resistência de falta de $0,1\Omega$ e 10Ω chegaram a ocorrer diferenças de 5,60%.

Os elevados erros apresentados são resultado do não desacoplamento dos sistemas assimétricos ou desbalanceados através de Clarke, onde elementos mútuos continuam existindo no domínio modal trazendo erros para o algoritmo. Dessa forma, constata-se que o algoritmo de localização de falta não é capaz de apresentar resultados confiáveis para uma LT na condição não transposta.

6.3 Comparação entre o Método Implementado e o Método Utilizado por Joe Air Jiang

O método implementado utiliza como base todo o algoritmo de localização de falta desenvolvido por Joe Air Jiang. Entretanto, a grande contribuição deste trabalho diz respeito a capacidade de desacoplamento do sistema. Constatou-se que o algoritmo Joe Air Jiang falha para faltas em LTs na condição não transposta devido à matriz de Clarke não ser capaz de desacoplar o sistema, conforme a seção 6.2. Assim sendo, o método implementado propõe primeiramente a obtenção das matrizes \mathbf{T}_v e \mathbf{T}_i capazes de desacoplar o sistema. Consequentemente, para fins de avaliação serão realizadas comparações entre os resultados para os casos ao qual Joe Air Jiang falhou.

A capacidade de estimação das matrizes \mathbf{T}_v e \mathbf{T}_i através do método desenvolvido, assim como a suposição de que o algoritmo de Joe Air Jiang funciona corretamente ao ser garantido o desacoplamento do sistema, é avaliada através das figuras 6.4 a 6.6.

Os resultados do método desenvolvido correspondem ao valor médio após 100 repetições consecutivas para cada caso. Tais repetições não são necessárias para uma aplicação prática, mas foram realizadas para provar que o método sempre convergirá para

um bom resultado. Os parâmetros do algoritmo genético utilizados foram exatamente iguais aos definidos no capítulo 5 e os gráficos são apresentados em escala logarítmica.

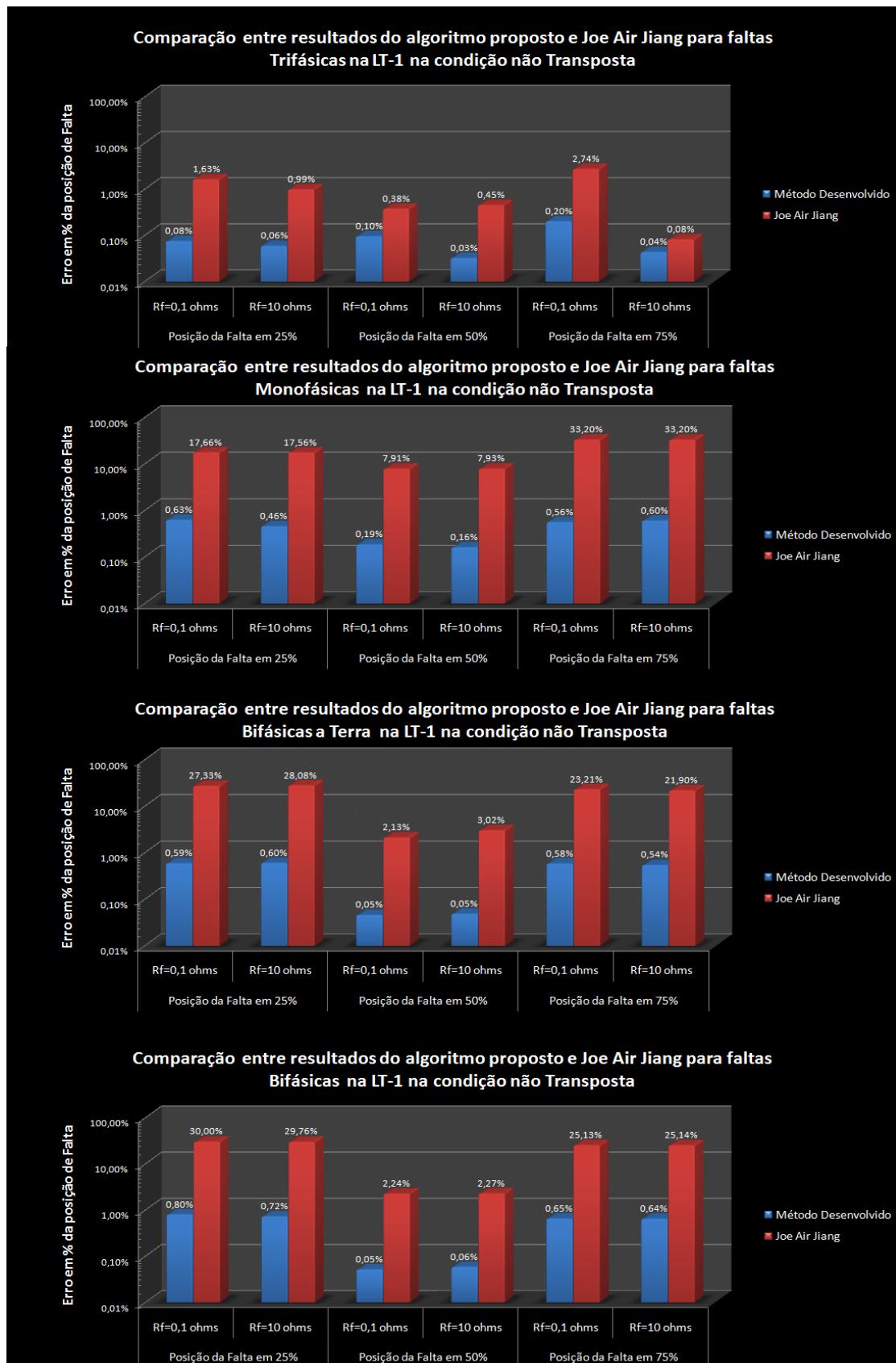


Figura 6.4 – Comparação entre o método desenvolvido e o utilizado por Joe Air para faltas na LT-1 em condição não transposta

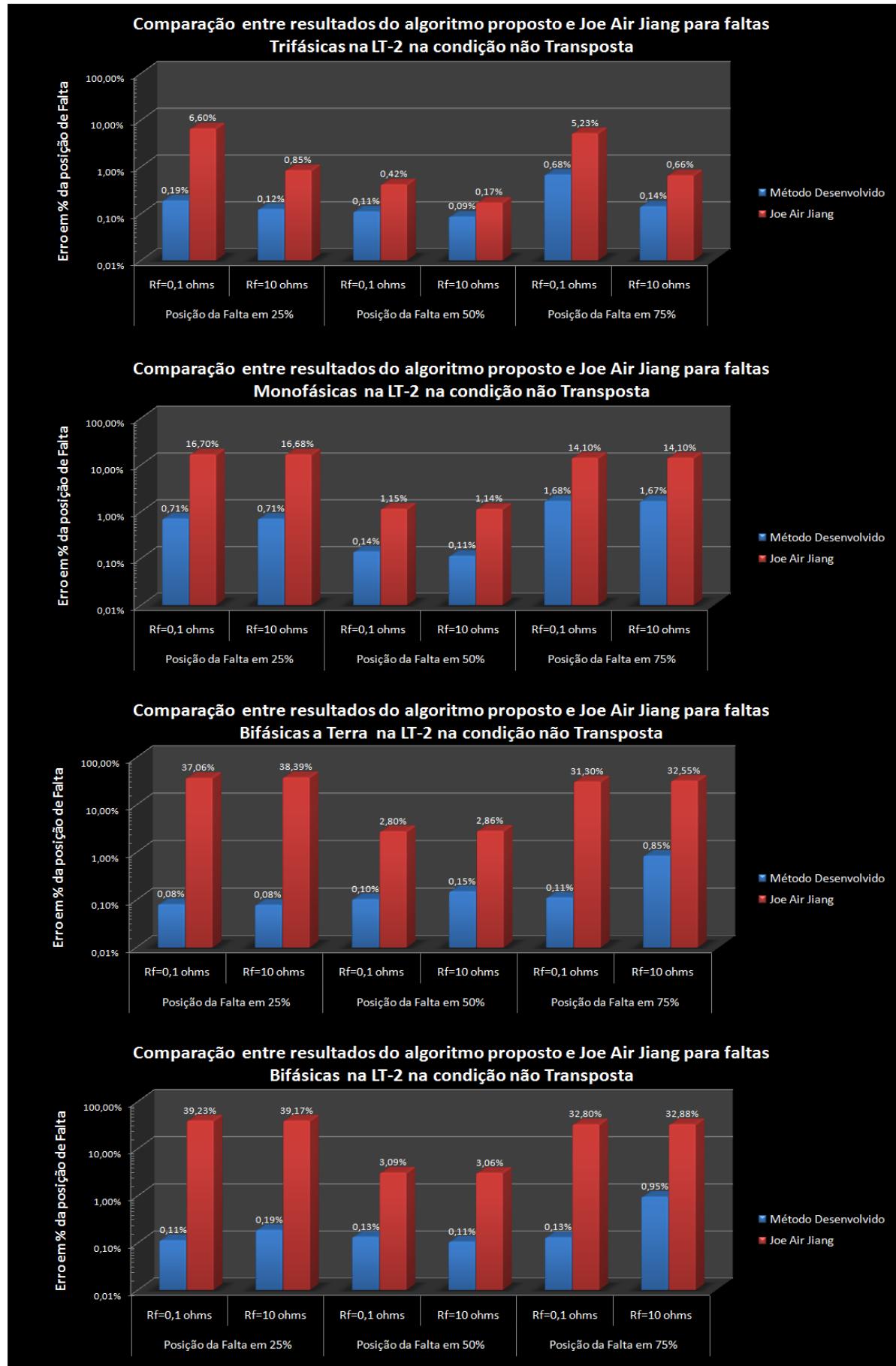


Figura 6.5 Comparação entre o método desenvolvido e o utilizado por Joe Air para faltas na LT-2 em condição não transposta

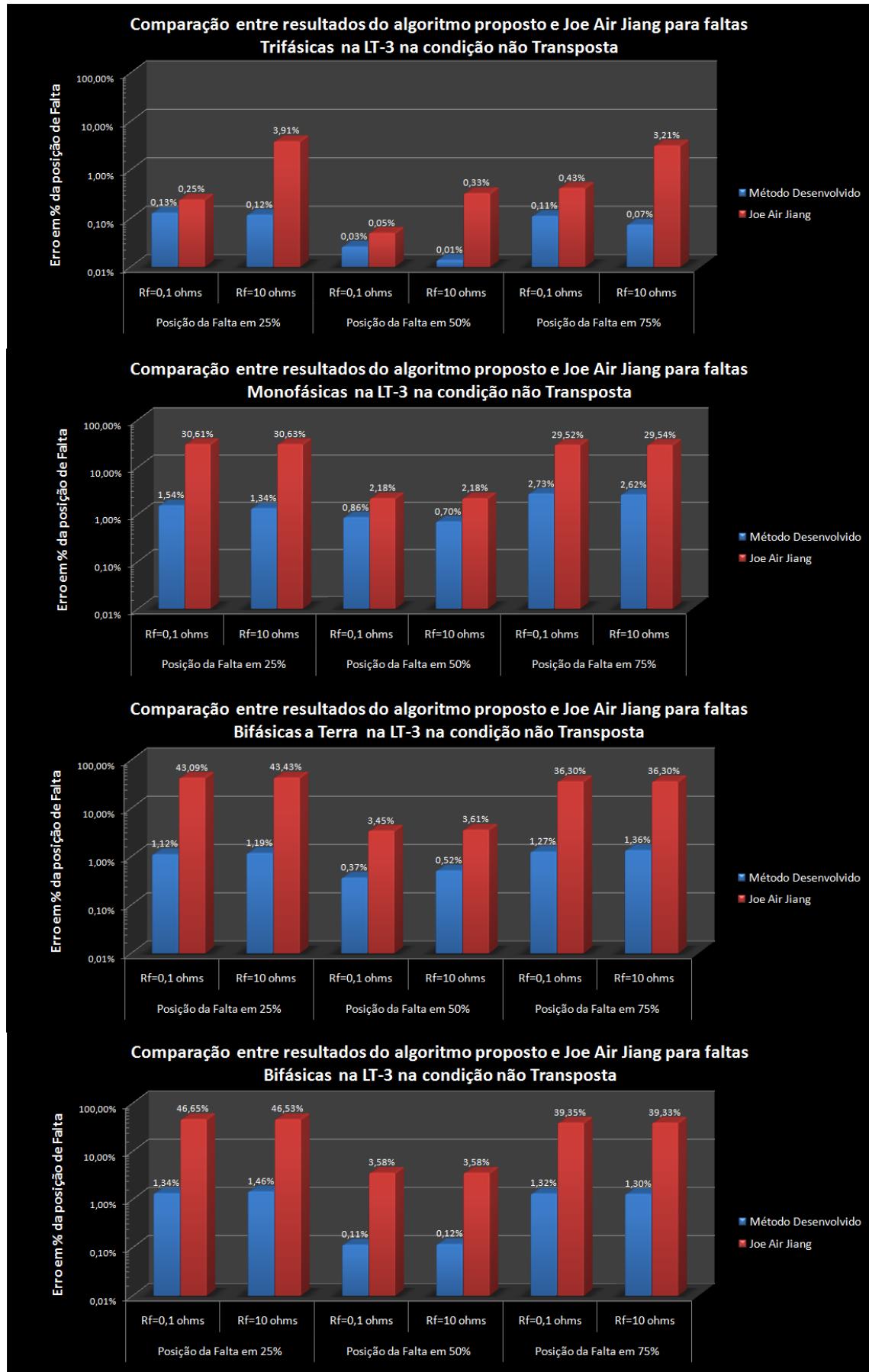


Figura 6.6 – Comparação entre o método desenvolvido e o utilizado por Joe Air para faltas na LT-3 em condição não transposta

Os resultados das comparações entre o método implementado e o utilizado por Joe Air Jiang para faltas nas LTs na condição não transpostas foram satisfatórios e conclusivos. Para os 3 modelos de LT testados, os erros calculados para todos os casos foram sempre menores aos calculados convencionalmente através de Joe Air Jiang. Verifica-se que o maior erro encontrado foi para falta monofásica a 75% da LT-3, onde para uma resistência de falta de $0,1\Omega$ foi encontrado erro médio de 2,73%. Entretanto esse valor foi muito menor ao erro de 29,52% obtido pelo algoritmo de Joe Air, usando Clarke. Para faltas trifásicas próximas aos terminais das LTs, a elevada variação dos erros deixa de existir, resultando em erros de localização de faltas menores que 0,25%. Também, verifica-se que os erros aumentam para faltas próximas aos terminais das LTs, entretanto as variações encontradas foram muito menores com os resultados do correto desacoplamento. Para faltas ocorridas no meio das LTs (casos com menor erro de localização) foram obtidos valores de erro de até 0,01%. Para a maioria dos casos, os erros obtidos pelo método implementado foram da ordem de 10 vezes menores aos obtidos convencionalmente por Joe Air Jiang.

A partir dos resultados apresentados conclui-se que com o método desenvolvido torna-se possível calcular o ponto de ocorrência de faltas em linhas de transmissão na condição não transposta com boa exatidão. Dessa forma, confirma-se a capacidade de obtenção do desacoplamento modal das LTs não transpostas, assim como a suposição de que o algoritmo proposto por Joe Air Jiang funcionará para LTs desbalanceadas ou não transpostas, através de medição fasorial sincronizada, porém tendo o mais correto desacoplamento do sistema.

6.4 Aplicação do método desenvolvido frente a comuns variações dos parâmetros das LTs

As matrizes \mathbf{T}_v e \mathbf{T}_i são responsáveis pelo desacoplamento modal do sistema e as mesmas dependem das matrizes de impedância \mathbf{Z}_{Fase} e admitância \mathbf{Y}_{Fase} da LT. Sabendo que as matrizes \mathbf{Z}_{Fase} e \mathbf{Y}_{Fase} variam ao longo do tempo devido a possíveis e comuns variações de parâmetros da LT, o algoritmo genético implementado tem como objetivo garantir o desacoplamento do sistema frente a tais variações.

Para avaliar a capacidade de localização de faltas com o método implementado, serão realizados testes onde a resistividade do solo e resistência dos condutores sofrem variações. Tais parâmetros foram escolhidos por sofrerem influências do meio ambiente entorno da LT. A resistividade do solo, por exemplo, pode mudar com as condições

ambientais (solo seco ou solo encharcado) e a resistência do condutor é influenciada pela temperatura do mesmo, devido ao clima e/ou carregamento da LT.

6.4.1 Variação da Resistividade do Solo

O método implementado foi aplicado para resolver o problema da localização de faltas, as quais foram simuladas nas LTs apresentadas na seção 4.3.2, considerando as seguintes características:

- Resistividade do solo de $100\Omega \cdot m$, $1000 \Omega \cdot m$ e $10k \Omega \cdot m$;
- LT na condição transposta e não transposta;
- Faltas Trifásicas (3F), Monofásicas (F-T), Bifásica a Terra (F-F-T) e Bifásica (F-F)
- Posição de ocorrência da falta em 25%, 50% e 75% do comprimento total da LT a partir do terminal de recepção;
- Resistência de falta de $0,1 \Omega$ e 10Ω

Como já mencionado, para todos os testes apresentados neste capítulo, o fluxo de potência e as impedâncias equivalentes das fontes foram mantidas constantes. Os resultados da localização das faltas são apresentados através de erros entre os valores calculados e os valores exatos da posição da falta, relativos ao comprimento da LT para apenas o modo aéreo 1. Tais resultados encontram-se nas Figuras. 6.7 a 6.9, onde cada figura corresponde a um modelo de LT criado. Os gráficos são apresentados em escala logarítmica.

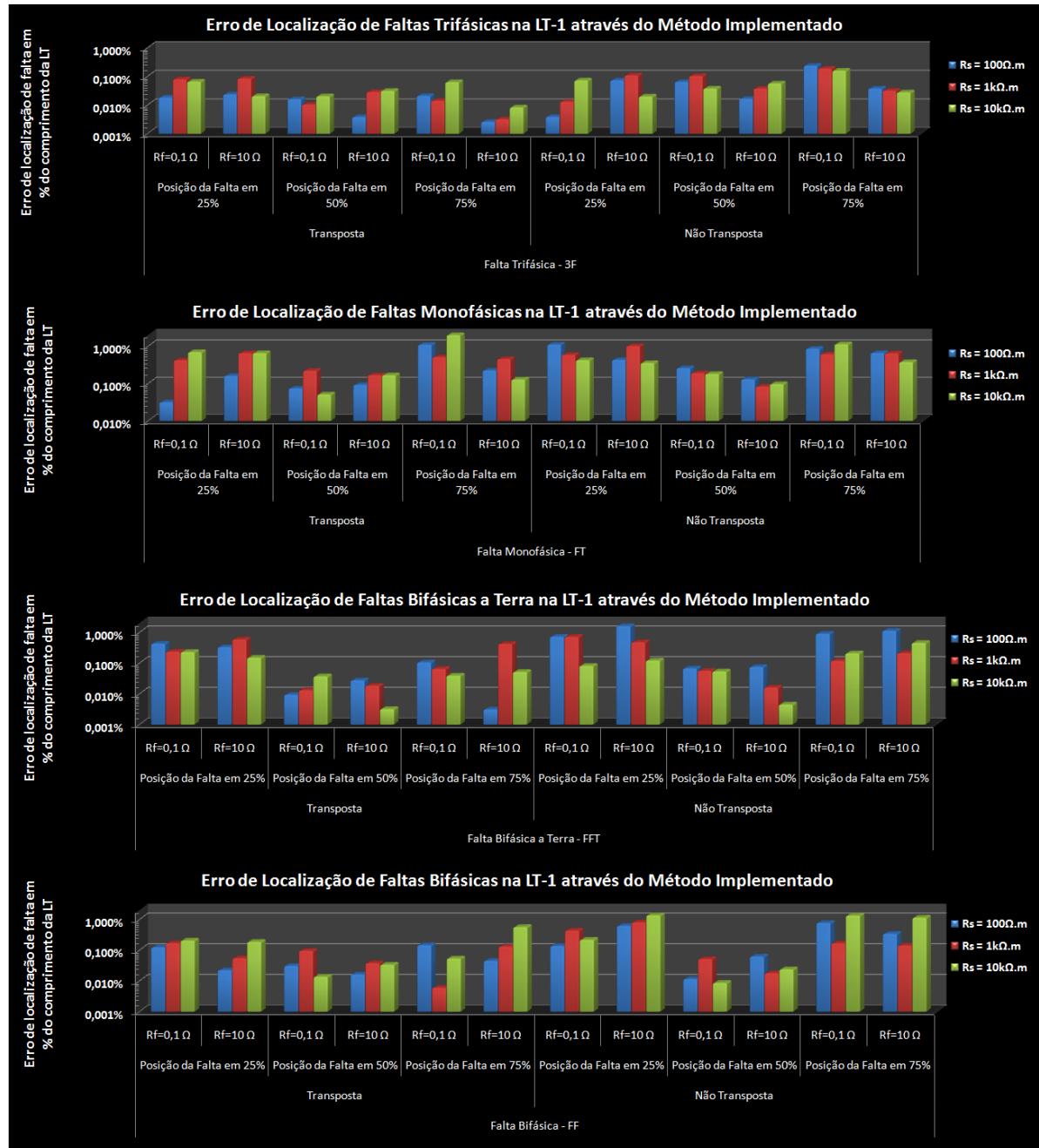


Figura 6.7 – Erro de Localização de Faltas à 25%, 50% e 75% da LT em % do comprimento da LT para a LT-1 modelada na condição transposta e não transposta – Variação da Resistividade do Solo

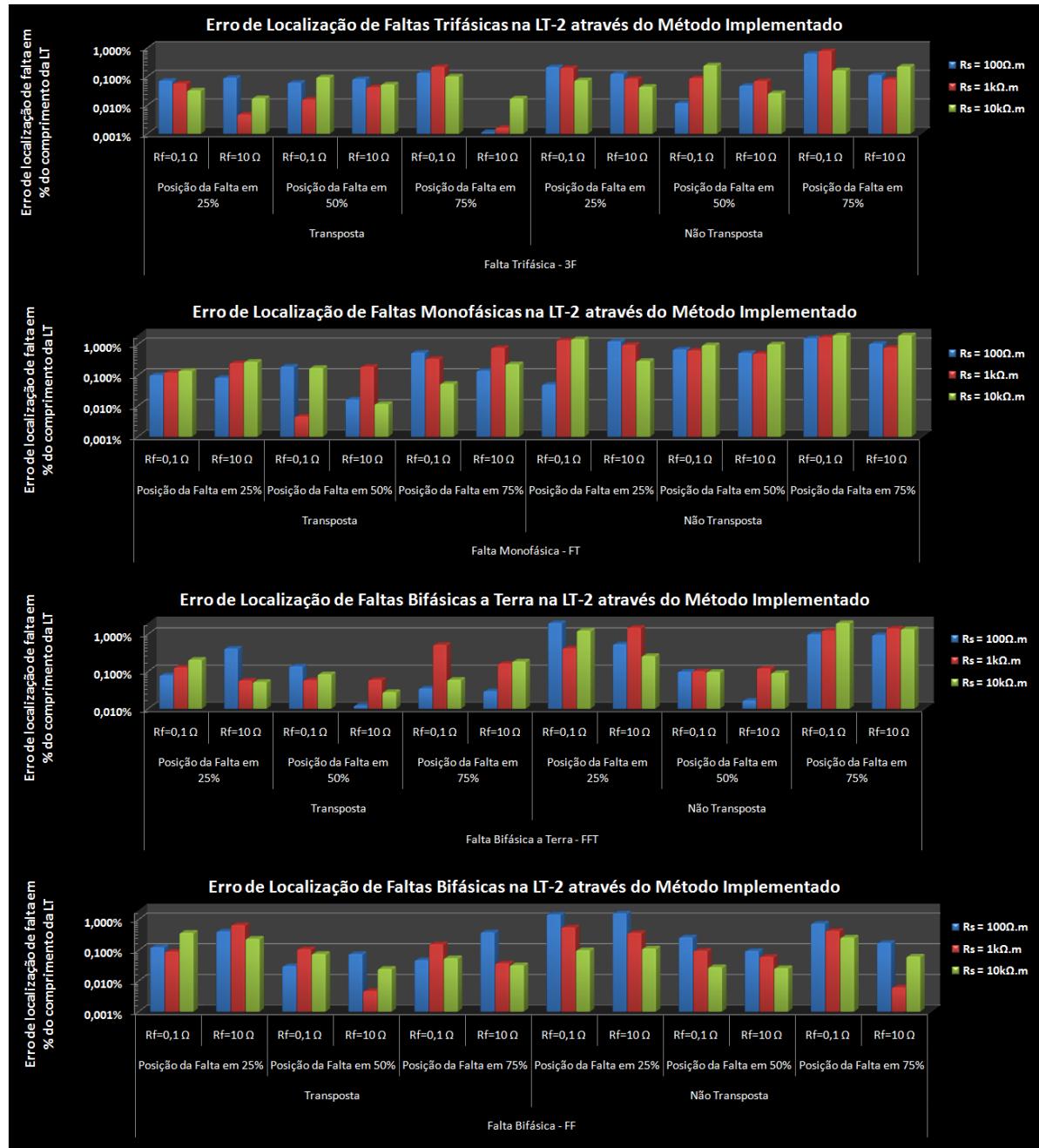


Figura 6.8 – Erro de Localização de Faltas à 25%, 50% e 75% da LT em % do comprimento da LT para a LT-2 modelada na condição transposta e não transposta – Variação da Resistividade do Solo

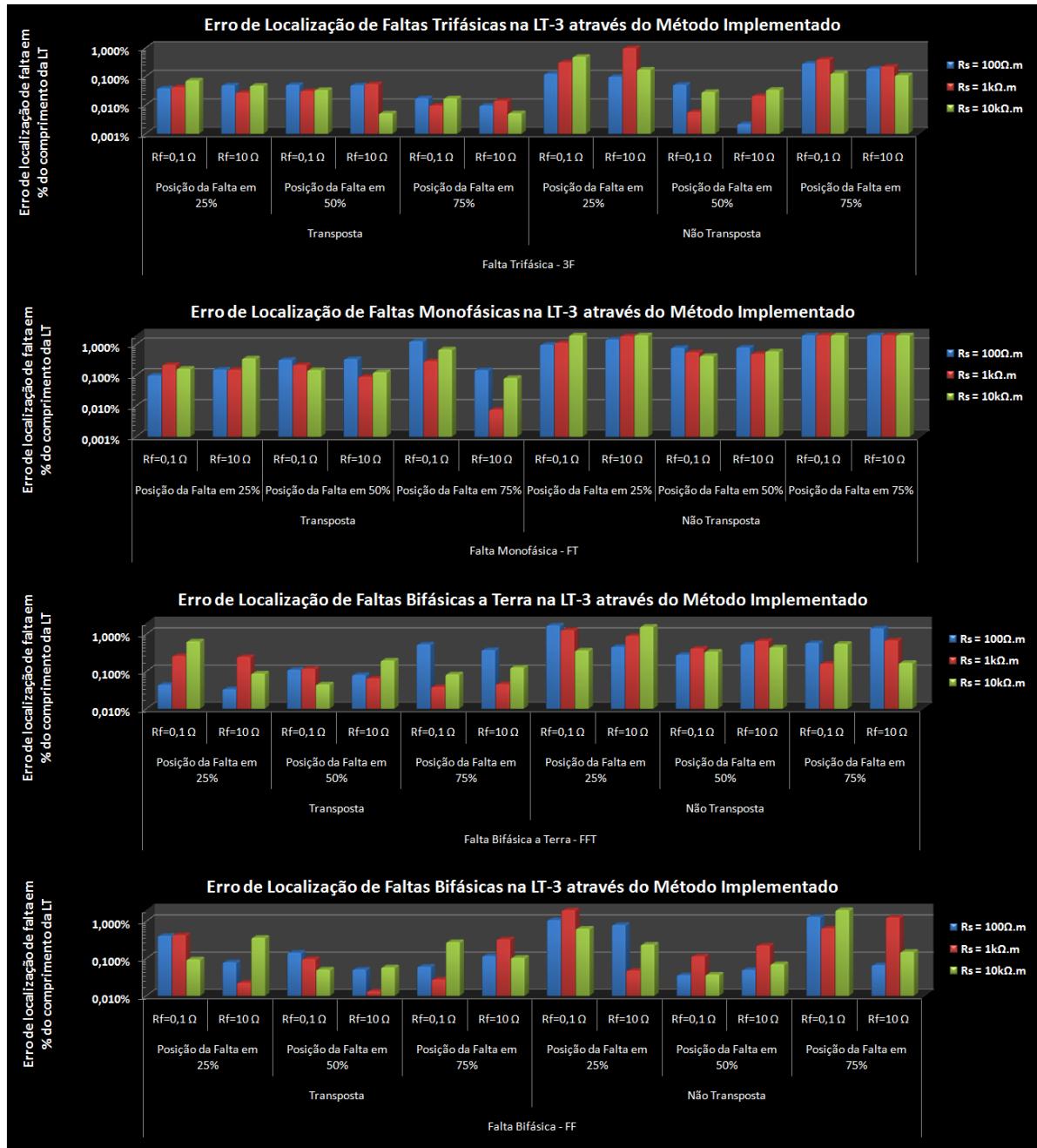


Figura 6.9 – Erro de Localização de Faltas à 25%, 50% e 75% da LT em % do comprimento da LT para a LT-3 modelada na condição transposta e não transposta – Variação da Resistividade do Solo

Analizando os resultados dos diversos casos simulados fica evidente que os erros calculados na grande maioria dos casos foram menores que 1%, não chegando a ultrapassar 2% para os casos em exceção. Foi constatada a não existência de padrões ao comparar os resultados para os três diferentes valores de resistividade do solo. Isso ocorreu devido à característica inerente do processo de busca através do algoritmo genético onde o que define o erro de localização de falta é o grau de aptidão alcançado. Entretanto, pode-se concluir que para as variações de resistividade do solo (variações em Z_{Fase}), o algoritmo genético foi

capaz de encontrar as matrizes \mathbf{T}_v e \mathbf{T}_i que desacoplam o sistema, proporcionando, através do algoritmo de Joe Air, erros de localização de falta em geral menores que 1%.

6.4.2 Variação da Resistência dos Condutores

As mesmas configurações dos testes realizados na seção 6.4.1 foram repetidas, porém com as variações da resistividade do solo substituídas por variações no valor da resistência dos condutores.

Primeiramente, considera-se 100% para os valores de resistências dos condutores de fase e cabos pára-raios determinados de acordo com o apresentado nas tabelas 4.3, 4.5 e 4.6 da seção 4.3.2 para cada modelo de LT criado. Dessa forma, os valores de resistência dos condutores utilizados nos testes passam a ter pesos de 90%, 100% e 110%. Resumindo, foram aplicadas variações de $\pm 10\%$ na resistência de cada condutor.

Mais uma vez os resultados da localização das faltas são apresentados através de erros entre os valores calculados e valores exatos da posição das mesmas, relativos ao comprimento da LT para apenas o modo aéreo 1. Tais resultados encontram-se nas Figuras. 6.10 a 6.12, onde cada figura corresponde a um modelo de LT criado. Os gráficos são apresentados em escala logarítmica.

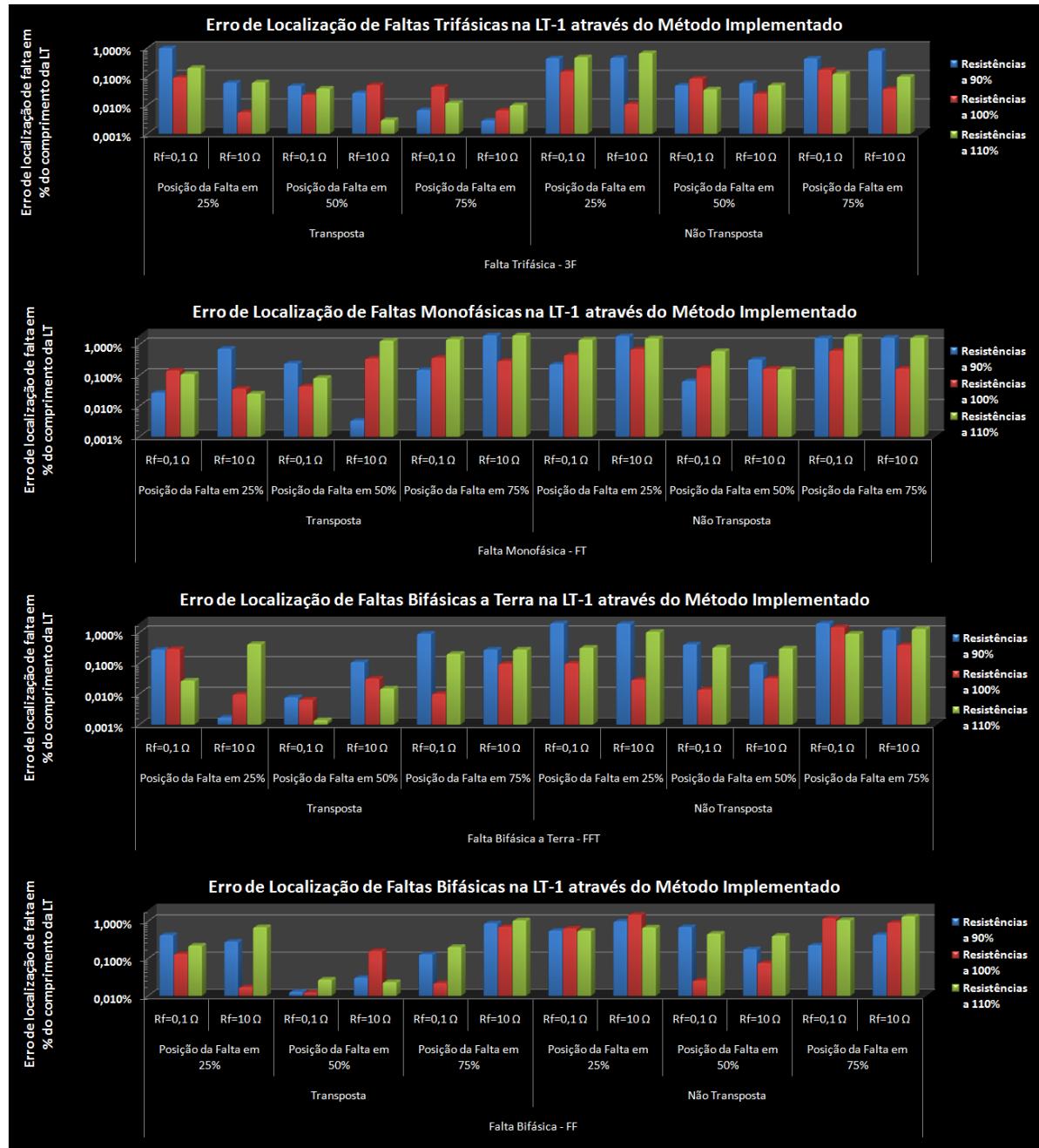


Figura 6.10 – Erro de Localização de Faltas à 25%, 50% e 75% da LT em % do comprimento da LT para a LT-1 modelada na condição transposta e não transposta – Variação da Resistência dos Condutores

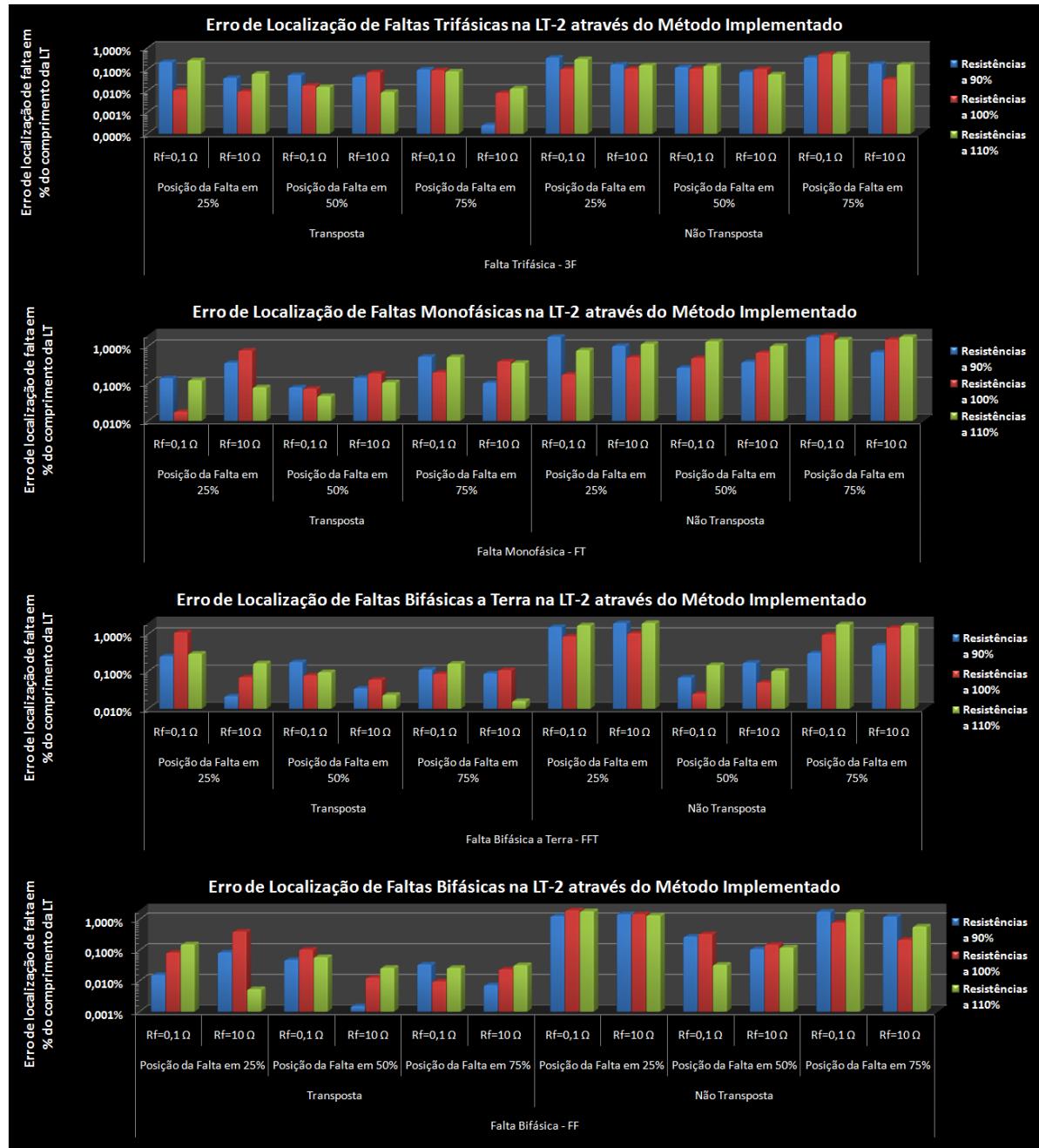


Figura 6.11 – Erro de Localização de Faltas à 25%, 50% e 75% da LT em % do comprimento da LT para a LT-2 modelada na condição transposta e não transposta – Variação da Resistência dos Condutores

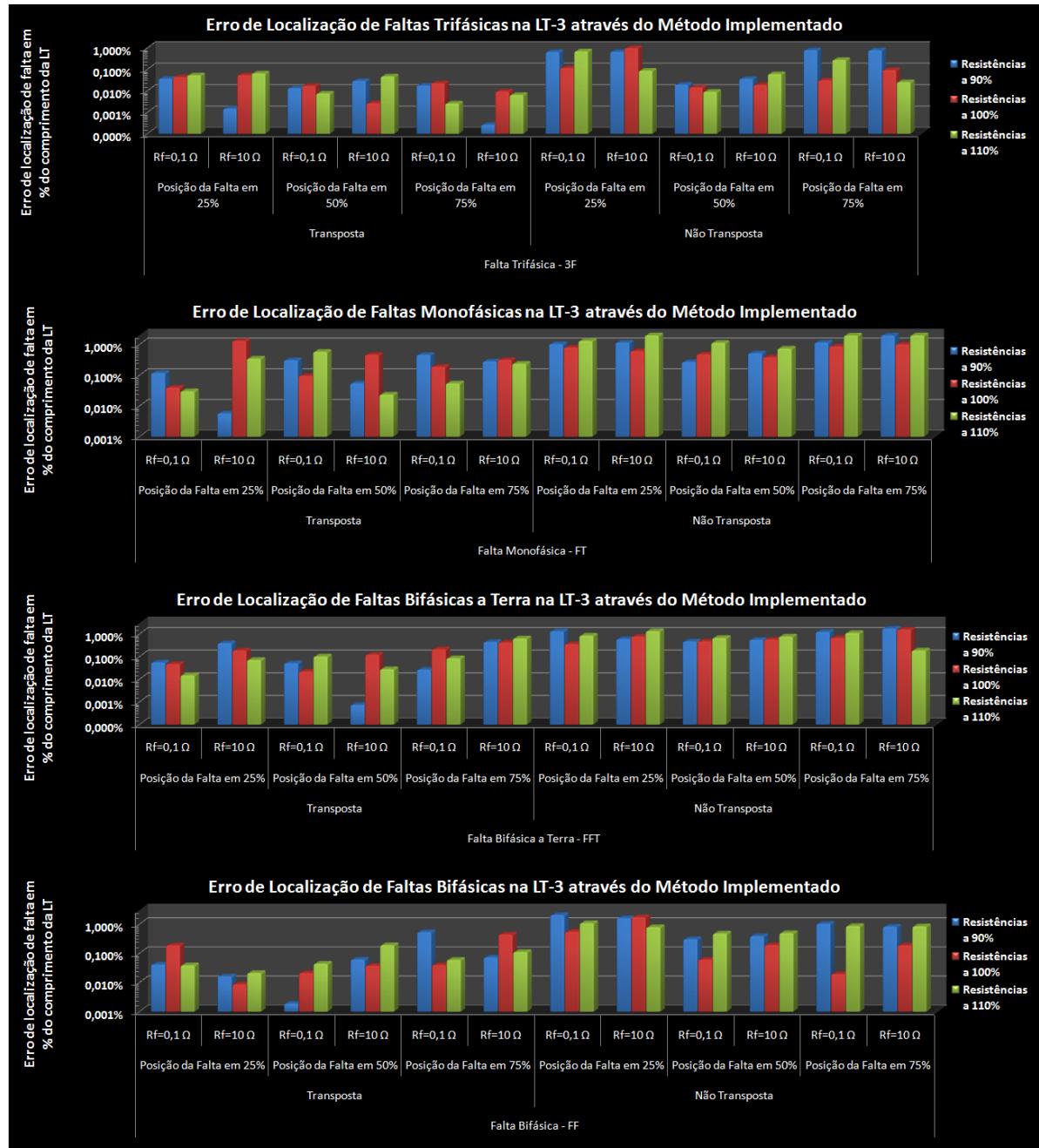


Figura 6.12 – Erro de Localização de Faltas à 25%, 50% e 75% da LT em % do comprimento da LT para a LT-3 modelada na condição transposta e não transposta – Variação da Resistência dos Condutores

Também para estes testes, os resultados dos diversos casos simulados mostram que os erros, na grande maioria dos casos, continuaram menores que 1%. Com algumas poucas exceções, estes chegaram a valores de até aproximadamente 2,5%. Diferentemente dos resultados obtidos na seção 6.4.1, foi possível identificar, para a maioria dos casos de teste um padrão de erros. Ao comparar os resultados para os três diferentes valores de resistência do condutor (90%, 100% e 110%), conclui-se que os erros calculados foram maiores para os casos onde a resistência do condutor sofreu um aumento ou diminuição de seu valor

original. Esse padrão de resultado foi evidenciado provavelmente pelo maior impacto da variação da resistência do condutor nas matrizes de impedância Z_{Fase} influenciando o desempenho do algoritmo genético. Entretanto, tal desempenho foi o suficiente para manter, em geral, os erros de localização de falta menores que 1%.

6.5 Considerações Finais

Os resultados apresentados neste capítulo foram de grande importância para uma validação do desempenho do método implementado. No capítulo seguinte será feita uma abordagem mais ampla da contribuição deste trabalho.

Capítulo 7

Conclusões

7.1 Conclusões e Contribuições

Equation Chapter 7 Section 1

Neste trabalho de dissertação de mestrado foi proposta uma solução para melhoria da exatidão de localização de faltas aplicadas em linhas de transmissão trifásicas, transpostas, não transpostas ou desbalanceadas. Baseado em sincrofatores e num processo de busca utilizando algoritmo genético, o método resulta no correto desacoplamento do sistema e consequentemente na correta estimativa do ponto de falta na linha de transmissão utilizando o algoritmo de localização proposto por Joe Air Jiang.

O método foi avaliado através de simulações computacionais em ambiente Matlab e todos os dados do modelo do sistema foram obtidos através do ATP. Foram simuladas diversas situações de faltas em três modelos diferentes de linha de transmissão na condição transposta ou não transposta, com o intuito de se obter conclusões sobre a aplicabilidade e eficácia do método.

Sabe-se que existem diversos métodos de localização de faltas com as mais variadas características, entretanto as aplicações de tais localizadores em linhas de transmissão na condição não transposta são consideravelmente limitadas. A localização de falta através de sincrofatores proposta por Joe Air Jiang (2000) foi avaliada. Este método foi desenvolvido apenas para aplicações em linhas de transmissão na condição transposta, onde boa exatidão e robustez foram alcançadas. Após avaliação de sua aplicação em linhas de transmissão não transpostas foi confirmado o desempenho inadequado do mesmo. Ao investigar os possíveis motivos pelo qual o bom desempenho não era alcançado, supôs-se que a incapacidade da matriz de transformação de Clarke em desacoplar sistemas desbalanceados ou assimétricos era a principal fonte de erros para o algoritmo. Nesse sentido, todo este trabalho foi realizado para a busca do correto desacoplamento do sistema, sendo ele balanceado ou não para a aplicação direta do algoritmo de Joe Air Jiang.

Após apresentação do método implementado, assim como dos resultados simulados, constatou-se que o método aplicado para localização de faltas é robusto e eficaz. Foi mostrado que para a maioria dos testes realizados os erros de localização ficaram menores que 1% e chegando a 2,5% para alguns poucos casos. Estes resultados levaram em consideração possíveis e reais alterações de parâmetros de linhas de transmissão ao longo do tempo, mostrando a capacidade de adaptação do método frente a alterações do sistema.

Como desvantagem do método, é necessário algum conhecimento prévio de informações das matrizes de impedância e de admitância da LT, assim como o comprimento da mesma, entretanto tais informações são comumente obtidas quando do projeto. Outra desvantagem do método é a necessidade de um grande poder computacional para utilização do algoritmo genético, porém solucionado com o rápido avanço da tecnologia.

Assim, confirma-se a contribuição desta dissertação de mestrado para a localização de faltas em diferentes linhas de transmissão, principalmente para aquelas na condição não transposta.

Tal contribuição se refletiu na aceitação de um trabalho técnico publicado nos anais do APAP-2009 (“*International Conference on Advanced Power System Automation and Protection 2009*”) realizado em Jeju, Coréia do Sul em outubro de 2009, com o título de:

- *Optimized Estimation of Untransposed Transmission Lines Parameters using Phasor Measurement Units and its Application to Fault Location;*

7.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

Para a continuação dos estudos do desempenho do método proposto seguem as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

- Estudar características padrões das matrizes de impedância e admitância das linhas de transmissão implantadas no sistema elétrico brasileiro, buscando valores médios e variações máximas;
- Estudar esquemas evolutivos ou algoritmos genéticos com melhor desempenho para o processo de busca;
- Avaliar influências de problemas comuns a todos os sistemas de medição, como saturação de TC's, falhas de sincronismos de fasores, harmônicos entre outros;
- Desenvolver algoritmos de proteção baseados nas matrizes de transformação obtidas através do método implementado;
- Implementar o método em dispositivo eletrônico baseado em PSDs.

A realização das sugestões de melhorias, citadas anteriormente, certamente representará novas contribuições científicas para um assunto que ainda necessita de soluções e aprimoramento em diversos aspectos.

ANEXOS

8.1 Teoria de Autovalores e Autovetores

8.1.1 Comentários Iniciais

Autovalores e autovetores são conceitos importantes da matemática, com aplicações práticas em áreas diversificadas como mecânica quântica, processamento de imagens, análise de vibrações, mecânica dos sólidos, estatística, engenharia elétrica, etc.

Graficamente a idéia básica pode ser vista de uma forma bastante simples. Seja uma imagem formada por um retângulo com 2 vetores segundo a Fig. 8.1(a). Essa imagem sofre uma ampliação apenas na horizontal, ou seja, uma transformação T resultando no retângulo da Fig. 8.1(b).

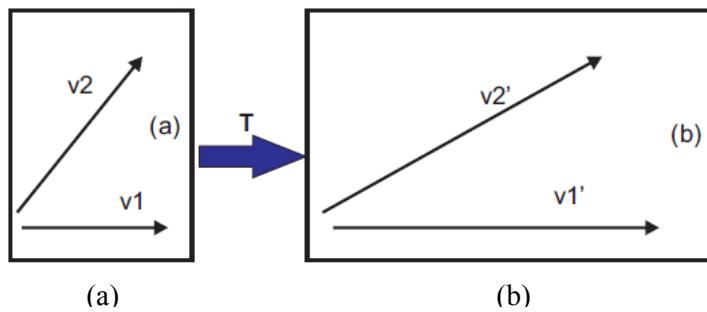


Figura 8.1 – Vetores antes e após transformação linear

Observar que o vetor v_2 passou a v_2' , que não tem a mesma direção do original v_2 . Portanto, o vetor v_2' não pode ser representado por v_2 multiplicado por um escalar. Mas o vetor v_1' tem a mesma direção de v_1 e, por isso, pode ser representado por v_1 multiplicado por um escalar. Diz-se então que v_1 é um autovetor da transformação e que esse escalar é um autovalor associado.

8.1.2 Definição Formal

Seja " V " um espaço vetorial de dimensão " n ", " A " uma matriz quadrada de ordem " n " e $T:V \rightarrow V$ uma transformação linear, definida para cada $v \in V$ por:

$$T(v) = A.v \quad (\text{A.1})$$

A teoria parte do princípio de que existe algum vetor $v \in V$, cuja imagem $T(v)$ pela transformação T tem a mesma direção que o vetor v , ou seja, existe um escalar $\mu \in K$ tal que:

$$T(v) = \mu.v \quad (\text{A.2})$$

Para tal, procura-se vetores $v \in V$ e escalares $\mu \in K$ para os quais

$$T(v) = A.v = \mu.v \quad (\text{A.3})$$

Seja " A " uma matriz quadrada de ordem " n ", se existe um escalar $\mu \in K$ e um vetor $v \neq 0$ tal que:

$$A.v = \mu.v \quad (\text{A.4})$$

Este escalar μ é denominado um autovalor de A e v é um autovetor associado a este escalar μ .

8.1.3 Cálculo dos Autovalores

Considerando I a matriz identidade de ordem " n ", pode-se escrever Eq.(A.5)

$$A.v = \mu.I.v \quad (\text{A.5})$$

De outra forma,

$$(\mu.I - A)v = 0 \quad (\text{A.6})$$

A função $f(\mu) = \det(\mu.I - A)$ é denominada função característica da matriz A . Para solução não nula da Eq.(A.6), deve-se ter o determinante

$$\det(\mu.I - A) = 0 \quad (\text{A.7})$$

Resolvendo a equação acima, obtém-se os valores de μ , autovalores da matriz A .

8.1.4 Cálculo dos Autovetores

Para cada autovalor encontrado existe ao menos um vetor não nulo que satisfaça a Eq.(A.5). Esses vetores obtidos são vetores chamados de autovetores (v). Ao substituir cada μ encontrado na Eq. (A.5) podem existir infinitas soluções de v . Ou seja, para cada autovalor obtido pode existir um conjunto de autovetores associado. Tal conjunto é definido por autoespaço associado ao autovalor.

8.1.5 Matriz de transformação

A matriz de transformação P é formada agrupando os autovetores de cada autoespaço associado a um autovalor em colunas da matriz P . A matriz P aplicada na matriz A conforme Eq.(A.8) resulta na matriz semelhante B .

$$B = P^{-1} \cdot A \cdot P \quad (\text{A.8})$$

A matriz B que por definição é semelhante à matriz A . Tem como característica ser uma matriz diagonal e composta pelos autovalores de A . A matriz B também é chamada de matriz modal de A .

8.1.6 Exemplo de Aplicação

É interessante apresentar que as conhecidas matrizes de transformação de “Clarke” e “Análise” são casos particulares do desenvolvimento até então apresentado da teoria de autovalores e autovetores, onde a matriz A é representada por uma matriz de impedância de um sistema transposto e v representado por vetores de correntes do mesmo sistema.

$$\begin{bmatrix} \Delta V_a \\ \Delta V_b \\ \Delta V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_p & Z_m & Z_m \\ Z_m & Z_p & Z_m \\ Z_m & Z_m & Z_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (\text{A.9})$$

Ou da forma,

$$\Delta V = A.v \quad (\text{A.10})$$

Calculando os autovalores μ de A através de Eq.(A.7) temos:

$$\begin{bmatrix} \mu_1 \\ \mu_2 \\ \mu_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_p + 2Z_m \\ Z_p - Z_m \\ Z_p - Z_m \end{bmatrix} \quad (\text{A.11})$$

Ou seja, são encontrados três autovalores, sendo dois deles com o mesmo valor. Verifica-se que ao montar a matriz semelhante de A ou matriz modal de A , o resultado é exatamente o mesmo ao aplicar a matriz de transformação modal de “Análise” ou Clarke confirmado a teoria apresentada.

Para o cálculo do conjunto de autovetores associados ao primeiro autovalor encontrado temos:

$$\begin{bmatrix} \Delta V_a \\ \Delta V_b \\ \Delta V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_p & Z_m & Z_m \\ Z_m & Z_p & Z_m \\ Z_m & Z_m & Z_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = (Z_p + 2Z_m) \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (\text{A.12})$$

$$\begin{bmatrix} 2Z_m & -Z_m & -Z_m \\ -Z_m & 2Z_m & -Z_m \\ -Z_m & -Z_m & 2Z_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = 0 \quad (\text{A.13})$$

Verifica-se que as únicas soluções desse sistema resultam no conjunto de quaisquer vetores iguais em direção e módulo. Para os dois autovalores restantes temos:

$$\begin{bmatrix} \Delta V_a \\ \Delta V_b \\ \Delta V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_p & Z_m & Z_m \\ Z_m & Z_p & Z_m \\ Z_m & Z_m & Z_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = (Z_p - Z_m) \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (\text{A.14})$$

$$\begin{bmatrix} -Z_m & -Z_m & -Z_m \\ -Z_m & -Z_m & -Z_m \\ -Z_m & -Z_m & -Z_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = 0 \quad (\text{A.15})$$

Verifica-se que as únicas soluções desse sistema resultam no conjunto de quaisquer vetores que somados se anulem.

Obtidos os resultados dos autovalores e autovetores do sistema do exemplo é fácil associá-los aos resultados dos estudos de componentes simétricas. Sabendo que a matriz de transformação P é composta pelos autovetores, uma rápida observação das transformações para componentes simétricas através matrizes de “Análise” Eq.(A.16) e “Clarke” Eq.(A.17), verifica-se que essas são compostas por valores iguais na primeira coluna e valores nas segunda e terceira colunas que somados se anulam, confirmando a aplicação da teoria.

Transformação modal utilizando a conhecida matriz de Análise normalizada:

$$\begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{e^{-j120^\circ}}{\sqrt{3}} & \frac{e^{j120^\circ}}{\sqrt{3}} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} Z_P & Z_M & Z_M \\ Z_M & Z_P & Z_M \\ Z_M & Z_M & Z_P \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{e^{-j120^\circ}}{\sqrt{3}} & \frac{e^{j120^\circ}}{\sqrt{3}} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_P + 2Z_M & 0 & 0 \\ 0 & Z_P - Z_M & 0 \\ 0 & 0 & Z_P - Z_M \end{pmatrix} \quad (\text{A.16})$$

Transformação modal utilizando a matriz de Clarke:

$$\begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{3}} & -1 & -1 \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{2}{\sqrt{6}} & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & -1 & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} Z_P & Z_M & Z_M \\ Z_M & Z_P & Z_M \\ Z_M & Z_M & Z_P \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{3}} & -1 & -1 \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{2}{\sqrt{6}} & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & -1 & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_P + 2Z_M & 0 & 0 \\ 0 & Z_P - Z_M & 0 \\ 0 & 0 & Z_P - Z_M \end{pmatrix} \quad (\text{A.17})$$

Conclui-se que para o caso particular de um sistema transposto e equilibrado, qualquer matriz de transformação normalizada que atenda as características descritas acima é capaz de desacoplar o sistema, resultando exatamente nos valores modais de sequência zero, sequência positiva e sequência negativa. Caso o sistema seja não transposto ou desequilibrado, a generalização deixa de existir, ou seja, para cada matriz a ser desacoplada existirá os particulares autovalores, assim como, os autovetores associados. Resultando numa matriz de transformação exclusiva para cada caso.

Referências Bibliográficas

- A. J. Prado J. Pissolato Filho, S. Kuokawa, L. F. Bovolato, (2005) “Non-transposed three-phase line analyses with a single real transformation matrix”, *The 2005 IEEE/Power Engineering Society General Meeting*, CD-ROM, 12-16, San Francisco, USA.
- A. T. Johns and S. Jamali, (1990) “Accurate fault location technique for power transmission lines,” *IEE Proceedings*, pt. C, vol. 137, no. 6, pp. 395–402.
- BEWLEY, L. V. (1963). Traveling waves on transmission systems. John Wiley & Sons, New York.
- Eshelman, L.J. (1991) The CHC adaptive search algorithm: How to do safe search when engaging in nontraditional genetic recombination. In Spatz, B.M. (Ed.). Foundations of Genetic Algorithms, , San Mateo, CA Morgan Kaufmann, pp. 265–283
- FUCHS, R. D. *Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica*. Escola Federal de Engenharia de Itajubá (EFEI), Itajubá, 1973.
- Goldberg, D.E., Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning, Addison Wesley Longman,1989;
- H. W. Dommel, (1987) “Eletromagnetic Transients Program –The Theory Book”, Oregon.
- HOLLAND J., 1975. Adaptation in Natural and Artificial Systems, MIT press, Massachusetts
- http://mspc.eng.br/matm/al_auto_val_vet_01.shtml
- <http://pessoal.sercomtel.com.br/matematica/superior/algebra/autoval/autoval.htm#autov01>
- J. A. Brandão Faria, (1997) “Modal Analysis of Untransposed Bilateral Three-Phase Lines – A Perturbation Approach-”, *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 12, pp. 497-504.
- J. A. Jiang, J. Z. Yang, Y. H. Lin, C. W. Liu, and J. C. Ma, (2000) “An adaptive PMU based fault detection / location technique for transmission lines—Part I: Theory and algorithms”, *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 5, pp. 1136–1146.
- J.-A. Jiang, Y.-H. Lin, J.-Z. Yang, T.-M. Too, and C.-W. Liu, “An adaptive PMU based fault detection/location technique for transmission lines—Part II:PMUimplementation and performance evaluation”, *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 15, no. 4, pp. 1136–1146, Oct. 2000.

- J. S. Monteiro, W. L. A. Neves, B. A. Souza, D. Fernandes Jr., e A. B. Fernandes, (2004) "Representações de Linhas de Transmissão Mutuamente Acopladas em Estudos de Fluxo de Potência". Anais do IEEE/PES/T&D Latin America, São Paulo.
- KALAM, A.; JOHNS, A. T. (1991). "Accurate fault location technique for multi-terminal EHV lines", *IEE International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management*, Hong Kong, p. 420-424, nov.
- L. M. Wedepholt, (1963) "Application of Matrix Methods to the Solution of Travelling Wave Phenomena in Polyphase Systems", *Proceedings IEE*, vol. 110, pp. 2200-2212.
- M. I. Gilany, O.P. Malik, and G. S. Hope, (1992) "A digital protection technique for parallel transmission lines using a single relay at each end," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 7, pp. 118-125.
- M. Miranda - <http://www.gta.ufrj.br/~marcio/genetic.html>
- MAGNAGO, F. H.; ABUR, A. (1998). "Fault location using wavelets", *IEEE Transactions on Power Delivery*, v.13, n.4, p. 1475-1480, oct.
- Operador Nacional do Sistema - ONS, (2002) "Procedimentos de Rede", Sub-módulo 2.4 - Requisitos Mínimos para Linhas de Transmissão, item 6.4.6.
- PASSOS, F. O. (2007) Estudo da Localização de Falta baseada na medição fasorial sincronizada em Linhas de Transmissão transpostas e não transpostas, Trabalho de Diploma - UNIFEI
- PHADKE, A. G.; 1993. Synchronized Phasor Measurement in Power Systems, IEEE Computer Applications on Power Systems, New York, v. 6, n. 2 (Apr), 10-15.
- Project EHV General Electric Company (1968) -EHV Transmission Line Reference Book, Edison Electric Institute, New York
- SILVA, M.(2003). Localização de faltas em linhas de Transmissão utilizando a teoria de ondas Viajantes e transformada wavelet. Dissertação de Mestrado – UFSC.
- SILVEIRA, P. M., Identificação e Localização de Faltas Utilizando Análise por Decomposição Wavelet para Relés de Linhas de Transmissão, Tese de doutorado, Florianópolis, UFSC, 2001.
- Srinivas, M. & Patnaik, L.M., Genetic Algorithms: A Survey , IEEE Computer Magazine, no. 6, June 1994

TAKAGI, T.; YAMAKOSHI, Y.; BABA, J.; UEMURA, K.; SAKAGUCHI, T. (1982a). "A new algorithm of an accurate fault location for EHV/UHV transmission lines: Part II – Laplace Transform method", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v.PAS-101, n.3, p. 564-573,, mar.

William D. Stevenson, J, 1978, Elementos de análise de sistemas de potência, McGraw-Hill, São Paulo.