UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO–USP
ESCOLA POLITÉCNICA

RONALD ADRIAN POMA FUENTES

**Localização de faltas em linhas de
transmissão baseada em métodos
heurísticos utilizando dados de um
terminal**

São Paulo
2015

RONALD ADRIAN POMA FUENTES

**Localização de faltas em linhas de
transmissão baseada em métodos
heurísticos utilizando dados de um
terminal**

Dissertação de mestrado apresentada à Escola Politécnica para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de concentração: Sistemas Elétricos de Potência

Orientador: Prof. Dr. Giovanni Manassero Junior

São Paulo
2015

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

Poma Fuentes, Ronald Adrian

Localização de faltas em linhas de transmissão baseada em métodos heurísticos utilizando dados de um terminal / R. A. Poma Fuentes -- versão corr. -- São Paulo, 2015.

136 p.

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

1.Linhas de transmissão 2.Localização de faltas 3.Métodos heurísticos
I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas II.t.

Dedico este trabalho aos meus pais Isabel Fuentes e Ronald Poma que contribuíram com incentivo e apoio, a mamá Florência in memoriam, minha irmã Karina, meu filho amado Ronaldinho que trouxe mais alegrias para minha vida, minha noiva Tânia pelo carinho e compreensão.

Agradecimentos

Primeiramente a Deus por conceder-me saúde e disposição sem o qual não seria possível superar as dificuldades enfrentadas nessa jornada especial da minha vida.

Ao meu orientador Prof. Dr. Giovanni Manassero Junior pela orientação, incentivo, ensinamentos e apoio técnico fornecido ao longo desta caminhada, fazendo desta uma experiência enriquecedora.

Ao Prof. Dr. Silvio Giuseppe Di Santo pelas sugestões.

Ao Eng. Leonardo Ramos Pereira pelo apoio e acompanhamento da realização dos ensaios no Laboratório de Proteção de Sistemas Elétricos L-PROT.

À CNPq, que através do seu programa de pesquisa, financiou o desenvolvimento deste trabalho.

Aos docentes, técnicos e funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica da Escola Politécnica - PEA, pela colaboração e ajuda que forneceram para a realização deste trabalho.

Aos meus amigos Dr. Carlos Alberto Febres, Me. Raphael Heideier, Me. Omar Chayña e todos que direta ou indiretamente contribuíram com incentivo e apoio no decorrer de mais esta etapa.

Resumo

Fuentes, Ronald Adrian Poma **Localização de faltas em linhas de transmissão baseada em métodos heurísticos utilizando dados de um terminal.** 136 p. Dissertação de mestrado – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2015.

Este trabalho apresenta o desenvolvimento e a implementação computacional de um algoritmo para a localização de faltas em linhas de transmissão. O algoritmo proposto é baseado em métodos heurísticos, isto é, Algoritmos Genéticos (AG) e *Pattern Search* (PS), sendo capaz de identificar o ponto de ocorrência da falta utilizando fasores de tensão e corrente de pré e pós-falta, estimados a partir de medições disponíveis apenas no terminal local da linha de transmissão. Nesta abordagem, ambas as ferramentas de otimização possuem natureza heurísticas sendo menos propensas a cair em valores mínimos locais, o que implica uma maior eficiência e precisão na determinação da localização da falta. Além disso, o método utiliza potências de curto-circuito monofásicas e trifásicas de ambos os terminais da linha (local e remoto), a fim de obter seus equivalentes de Thévenin, e os parâmetros elétricos da linha de transmissão.

Com o objetivo de avaliar o desempenho do algoritmo proposto, consideram-se nas simulações quatro sistemas de transmissão diferentes, que representam sistemas reais de transmissão brasileiros. O primeiro está constituído por uma típica linha de transmissão de 138 [kV] com circuito duplo, e os outros três sistemas são constituídos por linhas de transmissão típicas de 230, 500 e 765 [kV] com circuito simples. A partir dos quatro sistemas de transmissão simulados no software Alternative Transients Program (ATP/EMTP), foram gerados um total de 928 situações de falta. A versão do algoritmo desenvolvido para localização de faltas foram descritas e implementadas, através do software científico MATrix LABoratory (MATLAB), apresentando resultados com altos níveis de precisão.

Palavras-chave: Linhas de Transmissão. Localização de Faltas. Métodos Heurísticos.

Abstract

Fuentes, Ronald Adrian Poma **Transmission lines fault location based on heuristic methods and on one terminal data.** 136 p. Master Thesis – Polytechnic School, University of São Paulo, 2015.

This paper presents the development and implementation of a computational algorithm for location faults in transmission line. The proposed algorithm is based on heuristic methods, namely AG and PS, being able to identify the occurrence of the fault point using phasor voltage and current pre and post-fault, estimated from measurements available only on the local terminal of the transmission line. In this approach, both optimization tools have heuristic nature being less prone to falling into local minimum values, which implies greater efficiency and accuracy in the determination of fault location. Moreover, the method use singles-phase and three-phase short-circuit powers of both the line terminals (Local and remote), to obtain the Thévenin equivalent and the electrical parameters of the transmission line.

In order to evaluate the performance of the proposed algorithm were considered four different transmission systems; these systems represent real systems of Brazilian transmission. The first this made up of a transmission line typical of 138 [kV] with double circuit, the other three systems are made up of transmission line typical of 230, 500 and 765 [kV] of single circuit. Whereas the four simulated transmission systems in the software ATP/EMTP, generated a total of 928 situations fault. The version of the algorithm designed to locate faults, have been described and implemented through scientific software MATLAB, presenting results high levels of accuracy.

Keywords: Transmission Line. Fault Localization. Heuristic Methods.

Lista de ilustrações

Figura 1	Importância da localização exata da falta	17
Figura 2	Classificação dos métodos de localização de faltas	21
Figura 3	Sistema simplificado de localização de faltas usando dados de apenas um terminal da linha de transmissão	22
Figura 4	Sistema simplificado de localização de faltas usando dados de dois terminais da linha de transmissão	25
Figura 5	Linha de transmissão em falta usando dados de ambos os terminais. . .	27
Figura 6	Representação da linha de transmissão em falta.	29
Figura 7	Impedâncias das fontes e impedância equivalente da linha.	29
Figura 8	Ramificação dos Métodos Heurísticos.	32
Figura 9	Ramificação dos métodos de busca direta e computação evolucionária. .	33
Figura 10	Pseudocódigo da estrutura básica de um algoritmo genético.	36
Figura 11	Fluxograma representando o processamento de um algoritmo genético. .	37
Figura 12	Codificação binária de um indivíduo.	38
Figura 13	Codificação de um indivíduo por ponto flutuante.	39
Figura 14	Representação matricial da população inicial.	40
Figura 15	Representação do método da roleta.	42
Figura 16	Amostragem do método estocástico uniforme.	42
Figura 17	Esquema de seleção pelo método por torneio.	43
Figura 18	(a) Cruzamento de um ponto, (b) Cruzamento de dois pontos.	45
Figura 19	Cruzamento uniforme.	46
Figura 20	Mutação por troca de bit para codificação binária.	48
Figura 21	Pseudocódigo da estrutura básica do GPS.	52
Figura 22	Fluxograma do processamento do GPS.	53
Figura 23	Fluxograma da metodologia utilizada para localização de faltas.	58

Figura 24	Parâmetros distribuídos para um comprimento ∂x de uma linha monofásica.	59
Figura 25	Linha de transmissão trifásica não transposta no domínio de fases. . . .	61
Figura 26	Quadripolo representativo de uma linha de transmissão.	62
Figura 27	Modelo π -corrigido da linha trifásica.	63
Figura 28	Curto-circuito monofásico, fase-terra (AN).	66
Figura 29	Curto-circuito bifásico, dupla-fase (BC).	66
Figura 30	Curto-circuito bifásico-terra, dupla-fase-terra (BCN).	67
Figura 31	Curto-circuito trifásico (ABC).	67
Figura 32	Estrutura do processamento dos dados de entrada.	68
Figura 33	Circuito pré-falta do sistema de transmissão.	70
Figura 34	Representação do circuito pré-falta com quadripolos de transmissão, modelo π -corrigido.	71
Figura 35	Circuito pós-falta do sistema de transmissão.	72
Figura 36	Representação do circuito pós-falta com quadripolos, modelo π -corrigido.	72
Figura 37	Correntes que circulam no ponto de falta F.	73
Figura 38	Montagem da matriz de admitâncias para sistemas com circuito simples.	74
Figura 39	Sistema de transmissão de 138 [kV] - Circuito duplo na interface ATP-Draw.	84
Figura 40	Sistema de transmissão de 230, 500 e 765 [kV] - Circuito simples na interface ATPDraw.	84
Figura 41	Oscilografias de tensões (a) e correntes (b) no terminal local, para uma falta fase-terra AN em uma linha de transmissão de 138 [kV].	87
Figura 42	Oscilografias de tensões (a) e correntes (b) no terminal local, para uma falta dupla-fase BC em uma linha de transmissão de 230 [kV].	88
Figura 43	Oscilografias de tensões (a) e correntes (b) no terminal local, para uma falta dupla-fase-terra BCN em uma linha de transmissão de 500 [kV].	89
Figura 44	Oscilografias de tensões (a) e correntes (b) no terminal local, para uma falta trifásica ABC em uma linha de transmissão de 765 [kV].	90
Figura 45	Fluxograma do software de simulação proposto para a localização de faltas.	91
Figura 46	Histograma dos resultados obtidos para a LT - 138 [kV], “otimização 1”.	94
Figura 47	Superfície da função objetivo “otimização 1” para uma falta fase-terra AN na LT - 138 [kV] a 44,4 km do terminal local com resistência de falta de 20Ω	95
Figura 48	Histograma dos resultados obtidos para LT-138kV, “otimização 2”.	97
Figura 49	Histograma dos resultados obtidos para a LT - 230 [kV], “otimização 1”.	99

Figura 50	Superfície da função objetivo “otimização 1” para uma falta dupla-fase BC na LT - 230 [kV] a 32 km do terminal local com resistência de falta de 2Ω	100
Figura 51	Histograma dos resultados obtidos para LT-230kV, “otimização 2”. . . .	102
Figura 52	Histograma dos resultados obtidos para a LT - 500 [kV], “otimização 1”.104	
Figura 53	Superfície da função objetivo “otimização 1” para uma falta dupla-fase-terra BCN na LT - 500 [kV] a 144,8 km do terminal local com resistência de falta de $0,01\Omega$	105
Figura 54	Histograma dos resultados obtidos para LT-500kV, “otimização 2”. . . .	107
Figura 55	Histograma dos resultados obtidos para a LT - 765 [kV], “otimização 1”.109	
Figura 56	Superfície da função objetivo “otimização 1” para uma falta trifásica ABC na LT - 765 [kV] a 106 km do terminal local com resistência de falta de 2Ω	110
Figura 57	Histograma dos resultados obtidos para LT-765kV, “otimização 2”. . . .	112
Figura 58	Montagem da matriz de admitâncias para sistemas com circuito duplo.	125
Figura 59	Linha de transmissão de 138 [kV] - Circuito duplo.	129
Figura 60	Linha de transmissão de 230 [kV] - Circuito simples.	130
Figura 61	Linha de transmissão de 500 [kV] - Circuito simples.	131
Figura 62	Linha de transmissão de 765 [kV] - Circuito simples.	132

Lista de tabelas

Tabela 1	Analogia entre termos biológicos e algorítmicos.	34
Tabela 2	Atribuição da função aptidão.	40
Tabela 3	Estatística do processo de seleção.	42
Tabela 4	Definições dos critérios de parada para os AG.	51
Tabela 5	Critérios de parada para o <i>Pattern Search</i>	55
Tabela 6	Configurações do algoritmo genético	79
Tabela 7	Configurações do <i>Pattern Search</i>	81
Tabela 8	Características dos sistemas de transmissão simulados.	85
Tabela 9	Condições de operação dos sistemas de transmissão simulados.	86
Tabela 10	Erros de distância de falta em metros (m), “otimização 1” - 138 [kV].	93
Tabela 11	Erros de distância de falta percentual (%), “otimização 1” - 138 [kV].	93
Tabela 12	Erros de distância de falta em metros (m), “otimização 2” - 138 [kV].	96
Tabela 13	Erros de distância de falta percentual (%), “otimização 2” - 138 [kV].	96
Tabela 14	Erros de distância de falta em metros (m), “otimização 1” - 230 [kV].	98
Tabela 15	Erros de distância de falta percentual (%), “otimização 1” - 230 [kV].	98
Tabela 16	Erros de distância de falta em metros (m), “otimização 2” - 230 [kV].	101
Tabela 17	Erros de distância de falta percentual (%), “otimização 2” - 230 [kV].	101
Tabela 18	Erros de distância de falta em metros (m), “otimização 1” - 500 [kV].	103
Tabela 19	Erros de distância de falta percentual (%), “otimização 1” - 500 [kV].	103
Tabela 20	Erros de distância de falta em metros (m), “otimização 2” - 500 [kV].	106
Tabela 21	Erros de distância de falta percentual (%), “otimização 2” - 500 [kV].	106
Tabela 22	Erros de distância de falta em metros (m), “otimização 1” - 765 [kV].	108
Tabela 23	Erros de distância de falta percentual (%), “otimização 1” - 765 [kV].	108
Tabela 24	Erros de distância de falta em metros (m), “otimização 2” - 765 [kV].	111
Tabela 25	Erros de distância de falta percentual (%), “otimização 2” - 765 [kV].	111
Tabela 26	Erros de distância de falta percentual (%) com alteração nos parâmetros da linha, “otimização 1” - 138 [kV].	113

Tabela 27	Erros de distância de falta percentual (%) com alteração nos parâmetros da linha, “otimização 1” - 230 [kV].	114
Tabela 28	Erros de distância de falta percentual (%) com alteração nos equivalentes de Thévenin, “otimização 1” - 138 [kV].	114
Tabela 29	Erros de distância de falta percentual (%) com alteração nos equivalentes de Thévenin, “otimização 1” - 230 [kV].	115
Tabela 30	Dados e características da linha de transmissão de 138 [kV].	129
Tabela 31	Dados e características da linha de transmissão de 230 [kV].	130
Tabela 32	Dados e características da linha de transmissão de 230 [kV].	132
Tabela 33	Dados e características da linha de transmissão de 230 [kV].	133

Lista de siglas

AG Algoritmos Genéticos

ATP/EMTP Alternative Transients Program

COS Centro de Operação do Sistema

GPS *Generalized Pattern Search*

IED Intelligent Electronic Devices

LB Louder Bound

LCC Line Constants

MADS Mesh Adaptive Search

MATLAB MATrix LABoratory

ONS Operador Nacional do Sistema Elétrico

PMU Unidades de Medição Fasorial

PS *Pattern Search*

RDP Registradores Digitais de Perturbação

RNA Redes Neurais Artificiais

TC Transformador de Corrente

TDF Transformada Discreta de Fourier

TP Transformador de Potencial

UB Under Bound

Sumário

1	Introdução	16
1.1	Introdução	16
1.2	Objetivo	17
1.3	Motivação	18
1.4	Estrutura da dissertação	18
2	Revisão bibliográfica	20
2.1	Métodos de localização de faltas em linhas de transmissão	20
2.1.1	Métodos baseados em ondas viajantes	20
2.1.2	Métodos baseados em fasores de tensões e correntes	21
2.2	Aplicação de métodos heurísticos para a localização de faltas	26
2.2.1	Localização de faltas baseada em algoritmos genéticos	26
2.2.2	Localização de faltas baseada em Direct Search (<i>Nelder-Mead</i>)	28
3	Métodos heurísticos (ferramentas de otimização)	32
3.1	Algoritmos genéticos	33
3.1.1	Definições e terminologia dos algoritmos genéticos	34
3.1.2	Estrutura básica de um algoritmo genético	35
3.1.3	Representação ou codificação	37
3.1.4	Geração da população inicial	39
3.1.5	Avaliação da população inicial	39
3.1.6	Processo de seleção	40

3.1.7	Operadores genéticos	44
3.1.8	Parâmetros e estratégia utilizados pelos algoritmos genéticos . . .	49
3.2	Busca padrão (<i>Pattern Search</i>)	51
3.2.1	Estrutura básica do <i>Pattern Search</i>	52
3.2.2	Terminologia do <i>Pattern Search</i>	53
3.2.3	Critérios de Parada	54
3.3	Diferenças entre os métodos heurísticos e os métodos clássicos de otimização	55
3.4	Vantagens e desvantagens dos métodos heurísticos	56
4	Desenvolvimento da metodologia proposta e configuração das ferramentas de otimização	58
4.1	Modelagem do sistema de transmissão	59
4.1.1	Modelagem de linhas de transmissão	59
4.1.2	Modelagem dos sistemas equivalentes de Thévenin	64
4.1.3	Modelo de curto-circuito em linhas de transmissão	65
4.2	Processamento dos sinais de entrada	68
4.2.1	Extração da componente fundamental dos sinais de tensão e corrente	69
4.2.2	Identificação do tipo de falta	70
4.3	Algoritmo proposto para localização de faltas em linhas de transmissão .	70
4.3.1	Montagem da matriz de admitâncias do sistema elétrico	74
4.4	Função objetivo para a otimização da localização de faltas	76
4.5	Configurações das ferramentas de otimização	78
4.5.1	Parametrização do algoritmo genético	79
4.5.2	Parametrização do <i>Pattern Search</i>	81
5	Sistemas simulados e análise dos resultados	83
5.1	Sistemas simulados (Software ATP/EMTP)	83
5.1.1	Sistemas de transmissão simulados na interface do ATPDraw . . .	83
5.1.2	Condições operativas das linhas de transmissão	85
5.1.3	Oscilografias de faltas simuladas	87

5.1.4	Fluxograma do software de simulação para testes do algoritmo proposto para a localização de faltas	91
5.2	Análise dos resultados	91
5.2.1	Resultados para a linha de transmissão de 138 [kV]	92
5.2.2	Resultados para a linha de transmissão de 230 [kV]	97
5.2.3	Resultados para a linha de transmissão de 500 [kV]	102
5.2.4	Resultados para a linha de transmissão de 765 [kV]	107
5.3	Análise de robustez do algoritmo proposto	112
5.3.1	Influência na variação dos parâmetros da linha de transmissão . .	113
5.3.2	Influência na variação dos equivalentes de Thévenin	114
	Conclusões	116
	Referências	118
	Anexos	122
ANEXO A	Cálculo dos parâmetros do quadripolo de Transmissão.	123
ANEXO B	Montagem da matriz de admitâncias para sistemas com circuito duplo.	125
ANEXO C	Dados das linhas de transmissão.	128
C.1	Linha de Transmissão de 138 [kV] - Circuito Duplo.	128
C.2	Linha de Transmissão de 230 [kV] - Circuito Simples.	129
C.3	Linha de Transmissão de 500 [kV] - Circuito Simples.	131
C.4	Linha de Transmissão de 765 [kV] - Circuito Simples.	132
ANEXO D	Arquivo de entrada do ATP <.atp>	134

Introdução

1.1 Introdução

Um sistema de energia elétrica é projetado de maneira a atender a demanda desejada dentro de padrões de qualidade, confiabilidade e continuidade. No caso específico do sistema elétrico brasileiro, a matriz energética possui predominância hidroelétrica, que se encontra afastada dos centros de consumo. Essa característica faz com que as linhas de transmissão aéreas possuam grandes extensões e estejam sujeitas a intempéries, como descargas atmosféricas, tempestades, ventos fortes, poluição e altas insolações, que podem provocar diversos tipos de faltas, tirando-as de seu funcionamento normal.

Dos componentes existentes em um sistema elétrico de potência, a linha de transmissão é o elemento mais susceptível a faltas temporárias e/ou permanentes, principalmente por causa de suas dimensões físicas, complexidade funcional e as diversas condições de clima e topologia em que se encontram (OLESKOVICZ; COURY; AGGARWAL, 2003). O processo de extinção de faltas temporárias em linhas de transmissão, que pode envolver ou não a atuação de esquemas de religamento, normalmente é rápido. Assim a continuidade do sistema é afetada apenas durante curtos períodos de tempo. Quando uma falta permanente ocorre, a linha de transmissão atingida deve ser isolada e o fornecimento de energia é restaurado após a reparação do defeito. Em ambas as situações é de interesse da concessionária dispor de uma metodologia para localização de faltas, visto que o seu correto funcionamento pode auxiliar na redução dos tempos de interrupção de fornecimento, para o caso de faltas permanentes, e na manutenção programada e/ou baseada na condição, para o caso de faltas transitórias.

A saída de operação de uma linha de transmissão pode gerar impactos desastrosos para um sistema de energia, principalmente se essa falta ocorrer em um tronco de alta tensão, como nos blecautes ocorridos na região sudeste do Brasil em 1999 e 2002. Sendo assim, a localização exata da falta pode minimizar drasticamente o tempo de restabelecimento da linha de transmissão e os riscos de colapso do sistema elétrico de potência, além

de diminuir os custos operativos da equipe de manutenção. Esses fatores implicam em aumento de lucros para a concessionária, maior confiabilidade para o sistema elétrico, e aumento da satisfação do consumidor que recebe uma melhor qualidade do serviço.

A localização precisa do ponto de ocorrência de falta em linhas de transmissão é importante pois proporciona vários benefícios tanto para os consumidores quanto para as concessionárias de transmissão, conforme se ilustra na figura 1.

Figura 1: Importância da localização exata da falta

Fonte: Autor.

1.2 Objetivo

O objetivo principal deste trabalho é apresentar o desenvolvimento e a implementação computacional de um algoritmo para localização de faltas em linhas de transmissão, baseado em medições de tensões e correntes de pré e pós-falta efetuadas apenas no terminal local da linha de transmissão, bem como nos parâmetros elétricos dessas linhas e nas informações sobre a potência de curto-circuito monofásica e trifásica de ambos os terminais. Esse algoritmo utiliza dois métodos de otimização distintos: os AG e o PS.

A versão do algoritmo desenvolvido, assim como as rotinas de pré-localização, necessárias para o pré-processamento dos dados de entrada, foram descritas e implementadas, através do software científico MATLAB. Para avaliar o desempenho do algoritmo proposto foram simuladas diferentes situações de falta utilizando o software ATP/EMTP.

1.3 Motivação

Em linhas de transmissão, a proteção é realizada a partir de um sistema composto basicamente de disjuntores, transdutores e Dispositivos Eletrônicos Inteligentes (Intelligent Electronic Devices (IED)) que são microprocessados e vêm gradualmente substituindo os relés eletromecânicos. O procedimento de proteção realizado pelo IED é normalmente dividido em tarefas distintas, como detecção e classificação da falta. A função localização de faltas é uma função adicional desse equipamento, embora muito importante. Em cada uma dessas etapas, diferentes algoritmos podem ser utilizados, sendo a principal motivação deste trabalho a redução da imprecisão dos algoritmos tipicamente empregados na localização da falta.

Desta forma, é interessante que a função localização de faltas seja executada por meio de algoritmos mais elaborados, menos sujeitos a simplificações decorrentes de limitações de processamento, como os algoritmos de proteção dos IED, e capazes de fornecer melhores resultados.

Outra motivação para o desenvolvimento deste trabalho é a lacuna deixada na literatura quando se trata de algoritmos baseados em métodos heurísticos aplicados à localização de faltas em linhas de transmissão, que às vezes são desenvolvidos para uma linha de transmissão específica, o que inviabiliza a utilização prática dos mesmos. Por isto, decidiu-se explorar a área computacional da inteligência artificial, mais precisamente os métodos de otimização tais como o AG e o PS, já que estes métodos têm se mostrado bastante promissores ao longo de varias décadas de sua evolução.

1.4 Estrutura da dissertação

Esta dissertação está estruturada em capítulos da seguinte forma:

- ❑ **Capítulo 1:** apresentam-se a introdução, os objetivos e a motivação que levou à realização deste trabalho.
- ❑ **Capítulo 2:** contém a revisão bibliográfica sobre os métodos de localização de faltas em linhas de transmissão, assim como o estado da arte dos métodos que utilizam dados de apenas um terminal da linha de transmissão.
- ❑ **Capítulo 3:** esse capítulo contém as definições dos métodos heurísticos, assim como os fundamentos das ferramentas de otimização (AG e PS) utilizadas no desenvolvimento deste trabalho.
- ❑ **Capítulo 4:** apresentam-se a modelagem dos sistemas de transmissão, e os detalhes do processamento dos dados de entrada para a metodologia proposta para locali-

zação de faltas, bem como a metodologia propriamente dita e as configurações das ferramentas de otimização.

- ❑ **Capítulo 5:** esse capítulo contém a descrição dos sistemas simulados no software ATP/EMTP, e apresenta a análise dos resultados obtidos.
- ❑ **Conclusões:** apresentação das conclusões encontradas durante a realização do trabalho.
- ❑ **Anexos:** apresenta a complementação das informações contidas no texto, para que seja possível a reprodução das pesquisas desenvolvidas.
- ❑ **Referências:** apresentação da bibliografia consultada durante a elaboração desta dissertação.

Revisão bibliográfica

2.1 Métodos de localização de faltas em linhas de transmissão

A localização de faltas em linhas de transmissão é um assunto de grande interesse por parte das concessionárias de transmissão de energia elétrica e teve um grande desenvolvimento especialmente após o término da segunda guerra mundial. Até meados de 1950, os principais métodos de localização de faltas utilizavam técnicas baseadas na inspeção visual por meio de patrulhamento da linha de transmissão afetada, conforme apresentado na referência (STRINGFIELD; MARIHART; STEVENS, 1957). Apesar disso, os oscilógrafos existentes naquela época já eram vistos como equipamentos com um futuro promissor para a localização de faltas, uma vez que essa poderia ser realizada a partir de medições elétricas de tensões e correntes e, portanto, apresentar melhores resultados que os métodos empregados naquele momento.

A função de localização de faltas não tem requisitos de tempo real e, por essa razão, pode utilizar algoritmos que possuam níveis de precisão elevados, com objetivo de reduzir erros e minimizar os deslocamentos das equipes de manutenção e os tempos de restabelecimento do fornecimento de energia.

Neste capítulo, apresenta-se uma ampla revisão sobre os métodos de localização de faltas. Conforme a referência (MANASSERO, 2006) e ilustrado na figura 2, as abordagens tradicionais são classificadas em duas diferentes categorias: métodos baseados em ondas viajantes e métodos baseados em fasores de tensão e corrente.

2.1.1 Métodos baseados em ondas viajantes

Os métodos fundamentados na teoria de ondas viajantes utilizam as componentes de alta frequência dos sinais transitórios gerados por uma falta segundo (BEWLEY, 1931). Para a estimação do ponto de falta, esses métodos necessitam do tempo de propagação

Figura 2: Classificação dos métodos de localização de faltas

Fonte: (MANASSERO, 2006)

da onda viajante de tensão e/ou de corrente (incidente e refletida), desde o ponto da falta até o terminal de monitoramento, e da velocidade de propagação dessa onda, obtida de acordo com os parâmetros da linha de transmissão em análise.

A vantagem da utilização dos métodos baseados em ondas viajantes é a exatidão obtida na estimativa do ponto da falta. Embora esses métodos forneçam rápidas e precisas respostas ao problema de localização de faltas, eles têm a desvantagem de serem dependentes dos parâmetros do sistema e da configuração da rede, que podem influenciar na propagação do surto. Outras desvantagens são a dificuldade associada à aquisição de dados com altas taxas de amostragem, necessárias para um menor erro de localização, e a instalação de equipamentos específicos para a detecção de transitórios na linha de transmissão.

2.1.2 Métodos baseados em fasores de tensões e correntes

Os métodos que fazem uso de fasores de tensões e correntes para a localização de faltas em linhas de transmissão são em maior número quando comparados aos métodos que têm por base a técnica de ondas viajantes (TANG et al., 2000). Em síntese, os métodos baseados nos sinais de frequência fundamental consideram como dados de entrada os fasores de tensões e correntes extraídos das medidas de um ou ambos os terminais da linha de transmissão em falta.

Visto que os métodos baseados em fasores fundamentais dependem de informações que podem ser obtidas via IED e/ou Registradores Digitais de Perturbação (RDP) já instalados nas subestações elétricas e que é relativamente simples implementá-los, simulá-los e avaliá-los, pode-se dizer que esses métodos têm vantagens quando comparados com os métodos baseados em ondas viajantes. Como mostra a classificação descrita na figura 2,

eles se subdividem em duas grandes técnicas, uma capaz de localizar faltas baseando-se na utilização de dados de apenas um terminal e a outra se baseando na utilização de dados de ambos os terminais da linha de transmissão.

O método de localização via fasores fundamentais apresenta várias vantagens e está sendo bastante utilizado nas aplicações reais devido a sua maior simplicidade, menor custo, e pelo fato de depender de oscilografias já disponíveis nos IED. O algoritmo desenvolvido neste trabalho baseia-se em fasores fundamentais de tensões e correntes.

2.1.2.1 Métodos que utilizam dados de um terminal

As funções de localização de faltas que utilizam componentes fundamentais de tensão e corrente, obtidos em apenas um terminal da linha, surgiram na década de 1980. Esses métodos foram normalmente desenvolvidos como função adicional em relés de proteção e oscilógrafos, e utilizavam dados de apenas um terminal em virtude da inexistência e/ou precariedade dos canais de comunicação.

A figura 3 ilustra um sistema de localização de faltas de forma simplificada usando dados de um terminal. A amostragem dos dados é feita por um RDP ou por um IED, junto ao Transformador de Potencial (TP) e Transformador de Corrente (TC) do terminal local da linha. Esses dados são enviados ao Centro de Operação do Sistema (COS) e processados pelo algoritmo de localização.

Figura 3: Sistema simplificado de localização de faltas usando dados de apenas um terminal da linha de transmissão

Fonte: Autor.

A vantagem apresentada por esses métodos é a possibilidade de serem implementados nos IED, alternativa normalmente preferida pelas concessionárias por ser a mais viável economicamente, apesar dos avanços na área de comunicação dos dados entre os terminais. É importante ressaltar que a localização de faltas, com o uso dos dados de somente um terminal da linha, só é precisa em linhas de transmissão de dois terminais, que são a grande maioria dos casos.

Um dos métodos que utilizam dados de apenas um terminal para a localização do ponto de falta é baseado na determinação da impedância aparente durante a falta, vista da linha de transmissão por uma de suas extremidades. Essa impedância é obtida em função dos parâmetros da linha e dos fasores de tensões e correntes nos períodos pré-falta e pós-falta, extraídos dos sinais registrados em um dos terminais da linha. A partir desses dados e da topologia do sistema pode-se localizar o ponto de ocorrência da falta.

A seguir são apresentados os métodos de localização de faltas, desenvolvidos recentemente, que utilizam dados de apenas um terminal da linha de transmissão.

(KUMAR; KUMAR, 2014): nesse artigo os autores propõem que todos os IED possuam dois algoritmos distintos para a localização de faltas, baseados no método da impedância, utilizando a modelagem da linha com parâmetros concentrados para linhas curtas e parâmetros distribuídos para linhas longas. O equacionamento matemático para a localização da falta em ambos os algoritmos usa fasores de apenas um terminal da linha, calculados com a Transformada Discreta de Fourier (TDF), além dos parâmetros da rede de ambos os terminais. Os resultados das simulações são validados com resultados obtidos por testes de dois relés comerciais, além de serem comparados com resultados de localização da falta por patrulhamento da linha depois de sua ocorrência. Essa comparação de resultados revela que o algoritmo deve ser baseado na modelagem de parâmetros concentrados para linhas curtas e na modelagem de parâmetros distribuídos para linhas médias e longas.

(LIMA et al., 2013): a proposta desse artigo é apresentar um algoritmo de localização de faltas baseado no método fasorial. Nesse algoritmo é estimada a corrente remota de pós-falta e o sistema equivalente de Thévenin remoto, a partir dos valores de tensão e corrente medidos no terminal local e da capacidade de curto-circuito do terminal remoto. O algoritmo é testado somente para faltas fase-terra com variação da resistência de falta e da distância da falta. Os resultados mostram que o algoritmo proposto não é sensível ante a variação da capacidade de curto-circuito do sistema remoto.

(WANG et al., 2013): o artigo propõe combinar a localização de faltas baseada no método fasorial com o método das ondas viajantes. O método proposto foi avaliado para faltas fase-terra e as simulações indicam um bom desempenho.

(FARSHAD; SADEH, 2012): a metodologia usada nesse trabalho consiste no cálculo

das amplitudes dos componentes harmônicos dos sinais de tensão. Os sinais de corrente não são utilizados, o que torna o algoritmo imune à saturação do TC. Os resultados dos testes realizados para uma linha de transmissão não transposta, com simulações unicamente para faltas fase-terra, são realmente promissores.

(JIALE; ZENGCHAO; XIAONING, 2011): o algoritmo de localização de faltas apresentado nesse artigo descreve a linha de transmissão em falta, por meio de um conjunto de equações diferenciais que utiliza o modelo de parâmetros concentrados. As variáveis desconhecidas são a distância da falta, a resistência da falta e a impedância equivalente de Thévenin do sistema remoto. O método de mínimos quadrados é usado para resolver essas equações, apresentando uma solução única. Os resultados das simulações demonstram alta precisão e baixo custo computacional para a localização e pode ser aplicado a todos os tipos de falta. Além disso, variações na impedância do Thévenin equivalente remoto não afetam os resultados da localização.

(CHENG et al., 2010): nesse artigo, integrasse o método fasorial para a localização de faltas. O algoritmo proposto toma como variáveis desconhecidas a impedância de Thévenin do equivalente remoto, a resistência de falta, e a distância da falta que fazem parte de um sistema de equações não lineares. O método de Newton-Raphson é aplicado para a solução efetiva dessas equações não lineares sem considerar nenhuma hipótese simplificadora. Esse algoritmo é testado unicamente para falta fase-terra, apresentando bom desempenho nos resultados.

(JAIN; THOKE; PATEL, 2009): esse artigo é baseado na aplicação de RNA. Segundo os autores, o algoritmo é insensível aos efeitos de acoplamento mútuo, variação do tipo de falta, distância da falta, ângulo de incidência e capacidade de curto-circuito do terminal remoto. Os resultados indicam que o algoritmo apresenta um bom nível de precisão.

(JAIN et al., 2009): o algoritmo desenvolvido apresenta uma complementação do algoritmo anterior (JAIN; THOKE; PATEL, 2009) e é capaz de localizar unicamente faltas dupla-fase. Esse algoritmo apresenta resultados mais precisos que o anterior.

(TAKAGI et al., 1981; TAKAGI et al., 1982a; TAKAGI et al., 1982b): Propõe-se um algoritmo de localização de faltas baseado no método fasorial, fundamentando-se no teorema da superposição. Os resultados se mostraram bastante eficientes para o caso de faltas sem resistência, no entanto, incluindo a resistência de falta, a deficiência na localização aumenta. Esses artigos são pioneiros e influenciaram o desenvolvimento de vários outros métodos baseados nos fasores de tensões e correntes. Atualmente servem como parâmetros de comparação.

2.1.2.2 Métodos que utilizam dados de dois ou mais terminais

Paralelamente ao desenvolvimento dos sistemas de comunicação foram surgindo novas propostas para a localização de faltas em linhas de transmissão, onde os cálculos da distância de falta dependem de dados de ambos os terminais da linha de transmissão. Esses métodos são capazes de captar com maior precisão, dados do sistema de transmissão, reduzindo as simplificações e incertezas, e apresentando melhor desempenho quando comparado com a utilização de algoritmos de apenas um terminal.

Entretanto, a localização de faltas usando este método só pode ser determinada com boa exatidão se as medições em ambos os terminais forem sincronizadas em relação a uma referência de tempo comum. Isso pode ser obtido por meio da utilização do *Global Positioning System*, por meio de Unidades de Medição Fasorial (PMU) ou por meio de métodos numéricos.

Conforme a figura 4, o método que utiliza dados de dois terminais necessita de um equipamento de comunicação para que haja transferência de dados para um lugar central ou para o outro terminal da linha. Através de tais dados e do uso de hardware e software auxiliares, torna-se possível a análise e o cálculo estimado da localização da falta.

Figura 4: Sistema simplificado de localização de faltas usando dados de dois terminais da linha de transmissão

Fonte: Autor.

No levantamento da literatura existente encontram-se vários exemplos de métodos que utilizam dados de dois ou mais terminais: (DUTTA; ESMAEILIAN; KEZUNOVIC, 2014; LIN; LIN; LIU, 2014; JIANG; WANG; LI, 2014; KANG; LIAO, 2013; KAWA; IZYKOWSKI, 2013; DAVOUDI; SADEH; KAMYAB, 2012; GONG; MYNAM; GUZMÁN, 2011; ESMAEILIAN et al., 2011; ZHANG; ZHOU; QIAN, 2011; KORRES; APOSTOLOPOULOS, 2010). Nessas referências, os autores descrevem técnicas de localização de faltas baseadas em Redes Neurais Artificiais (RNA), AG, sistemas de lógica nebulosa, dentre outras.

Dado o ponto de vista prático e econômico, interesses principais das concessionárias, é desejável a implementação de um algoritmo num IED, fato que tende aumentar o investimento e o interesse nos algoritmos que usam dados de um terminal. Portanto, o método de utilização de dados de dois ou mais terminais não será discutido neste trabalho.

2.2 Aplicação de métodos heurísticos para a localização de faltas

A maioria dos métodos para localização de faltas em linhas de transmissão, que utilizam dados de apenas um terminal, usam sistemas de equações construídos a partir de hipóteses simplificadoras que tornam possíveis as soluções desses sistemas, no entanto, reduzem o seu nível de precisão. Neste item são apresentadas as referências bibliográficas que utilizam técnicas de otimização para a solução desses sistemas de equações com o mínimo de hipóteses simplificadoras, de modo a aumentar a precisão da localização de faltas. Visto que este trabalho utiliza como ferramentas de otimização os AG e PS, a revisão bibliográfica se concentra nesses dois tópicos.

2.2.1 Localização de faltas baseada em algoritmos genéticos

A utilização de AG para localização de faltas em linhas de transmissão usando dados de apenas um terminal é ainda incipiente, encontrando-se escassa dentro da revisão da literatura, fato que motivou a realizar a implementação computacional mostrando-se adaptável ao problema. A seguir é apresentada uma referência que utiliza esse método para a localização de faltas em linhas de transmissão.

2.2.1.1 Método proposto em (ZHANG; ZHOU; QIAN, 2011)

A metodologia apresentada nessa referência utiliza fasores de tensões e correntes de ambos os terminais da linha de transmissão. O equacionamento matemático é direcionado para a determinação da tensão no ponto da falta calculada a partir da utilização de dados dos dois terminais da linha, representada na figura 5. Dessa forma, a metodologia garante que os resultados não são influenciados pela resistência de falta.

Figura 5: Linha de transmissão em falta usando dados de ambos os terminais.

Fonte: (ZHANG; ZHOU; QIAN, 2011).

Com base na figura 5, as tensões no ponto de falta F calculadas a partir de cada um dos terminais da linha são:

$$\dot{U}_F = \dot{U}_S \cdot \cosh(\gamma x) - \dot{I}_S \cdot \bar{Z}_C \cdot \sinh(\gamma x) \quad (1)$$

$$\dot{U}_F = \dot{U}_R \cdot \cosh(\gamma \cdot (\ell - x)) - \dot{I}_R \cdot \bar{Z}_C \cdot \sinh(\gamma \cdot (\ell - x)) \quad (2)$$

Sendo:

$$\gamma = \beta + j\alpha = \sqrt{(R_0 + j\omega \cdot L_0) \cdot (G_0 + j\omega \cdot C_0)} \quad (3)$$

$$\bar{Z}_C = \sqrt{\frac{R_0 + j\omega \cdot L_0}{G_0 + j\omega \cdot C_0}} \quad (4)$$

Nas equações 1 e 3, a frequência angular é ω , $\bar{Z}_C$ é a impedância característica, γ é o coeficiente de propagação e os parâmetros distribuídos da linha L_0 , C_0 , R_0 , G_0 são a indutância, capacitância, resistência e condutância, respectivamente.

Considerando falta de sincronismo nas amostras de dados de ambos os terminais da linha, o ângulo não sincronizado é δ mostrado na equação 5, que é chamada de equação de localização de falta de alta tensão baseada em amostra de dados não sincronizados de ambos os terminais da linha. No caso ideal, as equações 1 e 2 são iguais, resultando a equação 5.

$$\left(\dot{U}_S \cdot \cosh(\gamma \cdot x) - \dot{I}_S \cdot \bar{Z}_C \cdot \sinh(\gamma \cdot x) \right) \cdot e^{j\delta} = \dot{U}_R \cdot \cosh(\gamma \cdot (\ell - x)) - \dot{I}_R \cdot \bar{Z}_C \cdot \sinh(\gamma \cdot (\ell - x)) \quad (5)$$

Simplificando a equação 5 e denominando novos termos para sua representação obtêm-se as seguintes relações:

$$f_1(X) = f_1(x, \delta) = e^{2\beta_m x} \cdot [C_{Rm} \cdot \cos(2\alpha_m x) - C_{Mm} \cdot \text{sen}(2\alpha_m x)] + D_{Rm} + B_{Mm} \cdot \text{sen}\delta - e^{2\beta_m x} [A_{Rm} \cdot \cos(2\alpha_m x + \delta) + A_{Rm} \cdot \text{sen}(2\alpha_m x + \delta)] - B_{Rm} \cdot \cos\delta \quad (6)$$

$$f_2(X) = f_2(x, \delta) = e^{2\beta_m x} \cdot [C_{Mm} \cdot \cos(2\alpha_m x) + C_{Rm} \cdot \text{sen}(2\alpha_m x)] + D_{Mm} + B_{Rm} \cdot \text{sen}\delta - e^{2\beta_m x} [A_{Mm} \cdot \cos(2\alpha_m x + \delta) + A_{Rm} \cdot \text{sen}(2\alpha_m x + \delta)] - B_{Mm} \cdot \cos\delta \quad (7)$$

As equações 6 e 7 formam parte do equacionamento de localização de faltas com amostras não sincronizadas de ambos os terminais da linha, sendo estas equações tipicamente não lineares e tendo como variáveis x e δ , podem ser resolvidos pelos AG.

Finalmente é obtida a função objetivo a ser otimizada pelo AG:

$$F(X) = \sum_{k=1}^p \|f_k(X)\|_2^2 = \sum_{k=1}^p f_k(X)^T \cdot f_k(X) = \sum_{k=1}^p f_k^2(X) \quad (8)$$

Segundo os autores dessa referência, a codificação real foi escolhida para a implementação do AG em questão. Essa escolha permitiu que o tempo computacional para a convergência da função de otimização fosse reduzida. Os resultados apresentados indicam um bom nível de precisão.

2.2.2 Localização de faltas baseada em Direct Search (*Nelder-Mead*)

Devido ao fato dos métodos clássicos de otimização terem dificuldade em lidar com problemas de otimização global, recentemente tem crescido na literatura o interesse em resolver problemas desse tipo utilizando métodos heurísticos. O método de Direct Search ou também conhecido como método de busca direta é baseado nos métodos heurísticos. A seguir é apresentada uma referência fundamentada neste método.

2.2.2.1 Método proposto em (PEREIRA; ZANETTA, 2004)

A metodologia proposta nessa referência utiliza os equivalentes de Thévenin de ambos os terminais da linha de transmissão e a impedância equivalente de Thévenin da linha entre os dois terminais, conforme a figura 6.

Baseando-se na teoria de quadripolos de uma linha de transmissão, é possível calcular as tensões e correntes de pré-falta no terminal remoto $\left(\left[\dot{V}_R^{pré}\right], \left[\dot{I}_R^{pré}\right]\right)$, usando as tensões

Figura 6: Representação da linha de transmissão em falta.

Fonte: (PEREIRA; ZANETTA, 2004).

e correntes do terminal local $([\dot{V}_L^{pré}], [\dot{I}_L^{pré}])$. O quadripolo equivalente da linha de transmissão da figura 6 é representado pela equação 9, sendo $[A_{(\ell)}], [B_{(\ell)}], [C_{(\ell)}], [D_{(\ell)}]$, as constantes do quadripolo de transmissão.

$$\begin{cases} [\dot{V}_R^{pré}] = [A_{(\ell)}] \times [\dot{V}_L^{pré}] - [B_{(\ell)}] \times [\dot{I}_L^{pré}] \\ [\dot{I}_R^{pré}] = [C_{(\ell)}] \times [\dot{V}_L^{pré}] - [D_{(\ell)}] \times [\dot{I}_L^{pré}] \end{cases} \quad (9)$$

De acordo com a figura 7, o cálculo das fontes de tensões e correntes de Thévenin equivalente local e remoto $([\dot{V}_L^{eq}], [\dot{V}_R^{eq}], [\dot{I}_L^{pré}], [\dot{I}_R^{pré}])$, corrente equivalente de pré-falha da linha $([\dot{I}_{eq}^{pré}])$ são mostrados pela equação 10, sendo $[\bar{Y}_{eq}]$ a admitância equivalente da linha de transmissão.

Figura 7: Impedâncias das fontes e impedância equivalente da linha.

Fonte: (PEREIRA; ZANETTA, 2004).

$$\left\{ \begin{array}{l} [\dot{I}_L^{pré}] = [\dot{I}_L^{pré}] + [\dot{I}_{eq}^{pré}] \\ [\dot{I}_R^{pré}] = [\dot{I}_R^{pré}] - [\dot{I}_{eq}^{pré}] \\ [\dot{I}_{eq}^{pré}] = [\bar{Y}_{eq}] \times ([\dot{V}_L^{pré}] - [\dot{V}_R^{pré}]) \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} [\dot{V}_L^{eq}] = [\dot{V}_L^{pré}] + [Z_L] \times [\dot{I}_L^{pré}] \\ [\dot{V}_R^{eq}] = [\dot{V}_R^{pré}] + [Z_R] \times [\dot{I}_R^{pré}] \end{array} \right. \quad (10)$$

As tensões nodais do sistema de transmissão, durante a ocorrência da falta, podem ser calculadas usando a equação 11.

$$[\dot{V}_b] = [\bar{Y}_b]^{-1} \times [\dot{I}_b] \quad (11)$$

Onde:

$[\dot{V}_b]$: tensões nodais em L, F e R.

$[\bar{Y}_b]$: matriz de admitâncias nodais do sistema.

$[\dot{I}_b] = [\dot{I}_L^{inj} \mid [0] \mid \dot{I}_R^{inj}]$: correntes injetadas nos nós L, F e R.

Sendo:

$$[\dot{I}_L^{inj}] = [\bar{Y}_L] \cdot [\dot{V}_L^{eq}]$$

$$[\dot{I}_R^{inj}] = [\bar{Y}_R] \cdot [\dot{V}_R^{eq}]$$

A matriz de admitâncias de falta $[\bar{Y}_{(F)}]$ é diferente para cada tipo de falta, sendo assim, é necessário efetuar a classificação da falta antes de proceder com a localização. A título de exemplo, para uma falta fase-terra, na fase A, essa matriz fica conforme a equação 12:

$$[\bar{Y}_F] = \begin{bmatrix} \frac{1}{R_F} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

Para a montagem da matriz de admitâncias nodais do sistema deve-se dividir a matriz de admitâncias, que representa a linha de transmissão, em duas $([\bar{Y}_m], [\bar{Y}_n])$, depois incluir a matriz de admitâncias da falta $([\bar{Y}_F])$, e matrizes de admitâncias dos sistemas equivalentes de Thévenin local e remoto $([\bar{Y}_L], [\bar{Y}_R])$.

Onde:

$[\bar{Y}_m] = [\bar{Y}_d]$: matriz de admitâncias para a secção L-F, de comprimento d .

$[\bar{Y}_n] = [\bar{Y}_{(l-d)}]$: matriz de admitâncias para a secção F-R, de comprimento $(l-d)$.

A metodologia de localização de faltas baseia-se na comparação entre as tensões no terminal local da linha de transmissão, obtidas a partir do vetor $[\dot{V}_b]$, calculado pela

equação 11, e medidas nesse terminal, usando como função objetivo a soma dos módulos dos erros, apresentada pela equação 13.

$$F_{(d,R_F)} = \sum_{i=a,b,c} |\dot{V}_{L_i}^{calc.} - \dot{V}_{L_i}^{med.}| \quad (13)$$

Onde “i” indica a fase, as incógnitas são a distância de falta d e a resistência de falta R_F , que são obtidas através de um algoritmo de otimização para o mínimo da função $F_{(d,R_F)}$. O algoritmo de otimização utilizado foi o método de Direct Search, adotando uma ferramenta específica de otimização que é o Nelder-Mead simples.

O algoritmo proposto nesse artigo não usa hipóteses simplificadoras, e requer dados dos equivalentes de Thévenin de ambos os terminais da linha. A vantagem desse método é a sua independência quanto as correntes de pós-falta, o que elimina erros por saturação de TC. Segundo os autores esse algoritmo não é sensível a variações da impedância de Thévenin do terminal remoto. Além disso, pode ser empregado para linhas não transpostas e de circuito duplo.

Métodos heurísticos (ferramentas de otimização)

O termo “heurístico” pode ser definido como a arte de descobrir novas formas de se resolver problemas. Neste contexto, os métodos heurísticos podem ser definidos como estratégias capazes de resolver um dado problema de otimização através de um enfoque intuitivo, em geral racional. Os métodos heurísticos podem ser classificados de diversas formas, sendo em geral divididos conforme a figura 8.

Figura 8: Ramificação dos Métodos Heurísticos.

Fonte: Autor.

A solução desses problemas de otimização pode ser encontrada utilizando métodos determinísticos (clássicos), que embora possuam uma grande vantagem, de realizar um baixo número de avaliações da função objetivo, o que faz com que tenham convergência

rápida, apresentam uma inabilidade ao lidar com mínimos locais, pois estes trabalham com um único ponto do espaço de busca e com informações dos gradientes, não conseguindo avançar na busca e convergindo prematuramente sem encontrar o ótimo global.

Com tudo isso, escolheu-se neste trabalho os métodos heurísticos para a solução do problema de otimização, pois estes avaliam a função objetivo várias vezes sendo possível trabalhar com vários pontos ao mesmo tempo em uma iteração, possibilitando explorar devidamente toda a região do espaço de busca até convergir na solução ótima global. Estes métodos buscam a solução ótima através de regras de probabilidade sem precisar de derivadas nem informação de gradientes.

Neste trabalho, foram utilizados dois algoritmos de otimização baseados em métodos heurísticos: *pattern search* (PS) e algoritmos genéticos (AG), que se encontram dentro da ramificação dos métodos de busca direta (Direct Search) e computação evolucionária, respectivamente. Ilustrados pela figura 9.

Figura 9: Ramificação dos métodos de busca direta e computação evolucionaria.

Fonte: Autor.

A seguir serão descritas brevemente as técnicas de otimização utilizadas neste trabalho para a localização de faltas em linhas de transmissão.

3.1 Algoritmos genéticos

Nesta seção serão abordados de uma maneira detalhada os AG, que pertencem a uma família de métodos probabilísticos de otimização utilizando técnicas heurísticas, sendo apresentados também como uma das tecnologias da inteligência artificial, mais precisamente no ramo particular da computação evolucionária, que se baseia em idéias evolutivas

de genética e seleção natural. Durante os anos de 1950 e 1960, alguns cientistas computacionais estudaram os AG para que se tornassem uma ferramenta de otimização para a resolução de problemas no nível de ciências e aplicações na área de engenharia, baseando-se na genética natural e no processo da seleção natural proposto por Charles Darwin em 1858.

É nesse contexto que John Holland em 1962 propõe inicialmente os AG, buscando modelar sistemas complexos adaptativos e estudando a evolução através de simulação. Mas foi em (HOLLAND, 1975) que apresentou e fundamentou matematicamente os AG. Mesmo não tendo sido o primeiro a aplicar os conceitos da evolução natural na programação, foi o primeiro a provar matematicamente a eficácia da estratégia evolucionária em problemas de busca.

3.1.1 Definições e terminologia dos algoritmos genéticos

Como visto no item anterior, os AG são baseados nos fenômenos da biologia e teoria da evolução. Para entender melhor o conceito dos AG, (GOLBERG, 1989) apresenta uma analogia entre os termos usados na biologia e os termos computacionais referentes ao estudo dos AG, conforme a tabela 1.

Tabela 1: Analogia entre termos biológicos e algorítmicos.

	Termos na Biologia	Termos nos AG
Cromossomo	É um conjunto completo de genes de um organismo.	Representa um indivíduo ou solução do problema.
Gene	É a unidade básica do cromossomo e controla as características do organismo.	É um elemento do vetor que representa o indivíduo, ou seja, uma variável.
Alelo	Representa uma das formas alternativas de um gene.	Representa os valores que as variáveis podem assumir.
Genótipo	Representa a composição genética contida no cromossomo.	Representa a informação contida no indivíduo.
Fenótipo	É a estrutura ou organismo construído a partir das informações do genótipo.	Representa o indivíduo codificado.

Fonte: (GOLBERG, 1989).

Uma vez definida a analogia entre termos biológicos e algorítmicos, a seguir é apresentada as definições de termos utilizados computacionalmente nos AG:

População: representa o conjunto de indivíduos ou soluções.

Geração: representa o número de iterações que o algoritmo genético executa.

Pais e filhos: em cada geração o algoritmo genético cria populações, uma delas é chamada de população pais, a qual é usada para criar indivíduos na próxima geração, chamada de população filhos.

Função de aptidão ou função fitness: representa o quão apto é um determinado indivíduo perante os outros indivíduos da população daquela geração.

Indivíduo: é um simples membro da população, sendo um conjunto de variáveis $X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}^T$ que definem um ponto no qual se pode avaliar a função objetivo.

Função objetivo: é a função que se quer otimizar. Ela contém a informação numérica do desempenho de cada indivíduo na população, sendo usualmente expressa como: $Y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$, sendo $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ as variáveis que o AG procura determinar para otimizar Y .

Ponto ótimo: é o ponto caracterizado pelo vetor $X^* = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}^T$, formado pelas variáveis que otimizam a função objetivo e satisfazem as restrições do problema.

Valor ótimo: é o valor da função objetivo $f(X^*)$ no ponto ótimo.

Solução ótima: é o par de soluções formado pelo ponto ótimo e o valor ótimo $[X^*, f(X^*)]$, podendo ainda ser local (quando o valor ótimo é localizado), e global (quando o valor ótimo é global na região viável).

3.1.2 Estrutura básica de um algoritmo genético

Os AG trabalham com um conjunto de indivíduos que são soluções potenciais que melhor se ajustam ao ambiente do problema visando à otimização de uma função objetivo. As características específicas destes indivíduos determinam sua capacidade de sobrevivência, onde os indivíduos mais aptos sobrevivem durante o processo de otimização, o que propicia o surgimento de melhores configurações com indivíduos mais evoluídos. Este conjunto de indivíduos mais aptos constitui uma população capaz de evoluir, devido à aplicação dos operadores genéticos que são o cruzamento e a mutação e, após certo número de gerações, espera-se convergir para uma geração de elite que corresponda a uma solução ótima para o problema. Este procedimento iterativo continua até que um critério de parada seja alcançado, e um valor ótimo ou uma solução aceitável seja obtida. Considerando que cada iteração é uma geração, pode-se descrever o processo através do seguinte algoritmo:

Observa-se na figura 10 que toda a população inicial é substituída por novos indivíduos, gerados pelo processo de seleção e aplicação dos operadores genéticos. Isto é, toda a geração de pais é integralmente substituída por outra mais nova geração de filhos, não

Figura 10: Pseudocódigo da estrutura básica de um algoritmo genético.

Início*Gere a população P de indivíduos***Repita***Avalie indivíduos da população P* **Repita***Selecione dois indivíduos mais aptos de P para reprodução**Aplique operador de cruzamento**Aplique operador de mutação**Insira novo indivíduo em P'* *Até população P' completa* *$P \leftarrow P'$* *Até algum critério de parada seja satisfeito***Fim**

Fonte: Autor.

existindo convivência, o que provoca a perda de bons indivíduos no processo. Por esta razão é freqüentemente empregado o elitismo, ou seja, os melhores indivíduos de uma geração são preservados e passados diretamente para a geração seguinte. Posteriormente será detalhada a técnica do elitismo.

A idéia principal dos AG é a geração de novas populações cada vez melhores, portanto, é importante a avaliação de cada indivíduo segundo uma regra para determinar quão apto é um indivíduo. Quanto maior a aptidão, melhores são os indivíduos e esses terão mais chance de serem selecionados para gerar melhores descendentes para próxima geração, descartando assim os indivíduos com menor valor de aptidão.

Para implementar um algoritmo genético é preciso saber como se realiza o processo em cada iteração. A seguir o fluxograma ilustrado na figura 11 detalha os passos realizados em cada iteração.

Passo 1: escolhe-se uma representação para os indivíduos da população, que geralmente é feita utilizando a codificação binária ou real. Posteriormente escolhe-se uma população inicial, normalmente formada por indivíduos criados aleatoriamente.

Passo 2: avalia-se adequadamente a população segundo algum critério determinado pela função aptidão ou fitness que mede a qualidade do indivíduo.

Passo 3: estabelece-se uma estratégia de seleção dos indivíduos, para criação de um novo conjunto de indivíduos, ou seja, nova população chamada geração pais.

Passo 4: realiza-se um mecanismo que permita aplicar os operadores genéticos, cruza-

Figura 11: Fluxograma representando o processamento de um algoritmo genético.

Fonte: Autor.

mento e mutação.

Passo 5: após agrupar os indivíduos resultantes de todas as operações, obtém-se a nova população chamada geração filhos. Tal população é novamente avaliada dando início ao novo ciclo do processo.

Enquanto os critérios de parada não são alcançados, o processo continua ao longo das gerações e os indivíduos de cada população evoluem para a solução ótima do problema.

3.1.3 Representação ou codificação

É fundamental que o AG possua um mecanismo de codificação para representar as variáveis do problema a ser otimizado sabendo que esta codificação proporciona um grande impacto no desempenho de busca, devendo ser o mais simples possível sem perder as características de representação do problema tratado.

Existem várias maneiras de codificação do indivíduo. Inicialmente a codificação do indivíduo foi de maneira binária e de tamanho fixo proposto por (HOLLAND, 1975). Pos-

teriormente optou-se por codificar o indivíduo por ponto flutuante para representação de variáveis com números inteiros ou reais conforme (MICHALEWICZ, 2013). Dentre outras codificações encontramos a codificação de valores, por permutação, em árvore.

Neste trabalho de dissertação, para o desenvolvimento do AG é utilizada a codificação por ponto flutuante, uma vez que ocupa um menor tempo computacional durante o processo de iteração, quando comparado com a codificação binária.

❑ Codificação binária

A codificação binária é um vetor composto por uma cadeia de bits que podem assumir os valores de zeros e uns. Este tipo de codificação possui a vantagem de que a execução dos operadores genéticos se tornem mais fáceis no decorrer do processo. Por outro lado possui alguns problemas dentre os quais o principal é a dificuldade encontrada para a representação de números inteiros ou reais, sendo necessária a introdução constante de conversores no AG. Segundo (GOLBERG, 1989), a codificação binária é considerada uma aproximação clássica, porém o desempenho do algoritmo decresce se o número de parâmetros do problema for muito grande, tornando o processo de convergência lento.

Figura 12: Codificação binária de um indivíduo.

$$\text{Indivíduo}_{\text{Binário}} = \left[\underbrace{0000101101}_{\text{variável}_1} \quad \underbrace{0001100001}_{\text{variável}_2} \quad \underbrace{0000011001}_{\text{variável}_3} \quad \dots \quad \underbrace{1000010101}_{\text{variável}_N} \right]$$

Fonte: (HAUPT; HAUPT, 2004).

O indivíduo codificado de forma binária na figura 12 possui um número de N variáveis, sendo cada variável representada por dez bits. Para representar cada variável com números inteiros ou reais pela codificação binária é necessária uma conversão. Segundo (LINDEN, 2012) baseando-se nos limites superior e inferior de cada variável, pode-se realizar a conversão como mostra a equação 14.

$$\text{Valor Real} = \text{Inf}_i + \frac{\text{Sup}_i - \text{Inf}_i}{2^k - 1} \cdot r_i \quad (14)$$

Onde:

Inf_i : é o limite inferior da representação de cada variável.

Sup_i : é o limite superior da representação de cada variável.

r_i : é o valor da conversão binária para inteiro de cada variável.

k : é o número de bits de cada variável.

□ Codificação por ponto flutuante

A codificação do indivíduo por ponto flutuante é utilizada em problemas de otimização com variáveis reais de alta dimensionalidade e alta precisão, utilizando operadores especificamente especiais para uma codificação real. Simulações computacionais apresentadas em (JANIKOW; MICHALEWICZ, 1991) mostram uma comparação do desempenho do AG que usa codificação binária e codificação por pontos flutuantes, indicando que esta última apresenta uma clara superioridade de rapidez no processo. Segundo (HAUPT; HAUPT, 2004), uma vez que a codificação binária tem uma precisão limitada, a codificação por ponto flutuante permite facilmente a representação para uma melhor precisão assim como também exige menos espaço de armazenamento porque a variável é representada por um número real ao invés de uma cadeia de bits.

Figura 13: Codificação de um indivíduo por ponto flutuante.

$$\text{Indivíduo}_{\text{Real}} = \left[\underbrace{1,81064}_{\text{variável}_1} \quad \underbrace{0,58791}_{\text{variável}_2} \quad \underbrace{-13,98371}_{\text{variável}_3} \quad \dots \quad \underbrace{29,85701}_{\text{variável}_N} \right]$$

Fonte: (HAUPT; HAUPT, 2004).

3.1.4 Geração da população inicial

Para iniciar o processo de busca, os AG precisam de um conjunto de pontos iniciais, isto é, da população inicial que será representada por um conjunto de indivíduos. Na geração dessa população inicial encontram-se algumas abordagens existentes na literatura tais como: geração aleatória, heurística, uniforme. O objetivo principal de qualquer dessas abordagens é explorar soluções no espaço de busca e aumentar a diversidade da população. A geração da população inicial implementada no AG deste trabalho foi realizada de forma aleatória. A figura 14 ilustra a geração da população inicial para codificação binária e por ponto flutuante conforme (HAUPT; WERNER, 2007).

3.1.5 Avaliação da população inicial

Após gerar a população inicial esta precisa ser avaliada, sendo esta etapa uma das mais importantes para o sucesso dos AG, pois uma má avaliação pode levar o AG a não encontrar a solução do problema. A avaliação da população inicial é realizada utilizando uma função de aptidão também chamada função fitness. Esta função deve indicar a qualidade e avaliar a evolução de cada indivíduo da população a cada geração, assim, indivíduos com os mais altos graus de aptidão possuirão maiores chances de sobreviver nas próximas gerações. Segundo (LINDEN, 2012), cada indivíduo da população é avaliado

Figura 14: Representação matricial da população inicial.

$$\text{População}_{\text{binária}} = \begin{bmatrix} 110110 & 101010 & 111100 & \dots & 010101 \\ 000111 & 111110 & 101011 & \dots & 111101 \\ 111010 & 001001 & 011010 & \dots & 010010 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 001111 & 111110 & 001011 & \dots & 101110 \end{bmatrix} \begin{matrix} \text{indivíduo}_1 \\ \text{indivíduo}_2 \\ \text{indivíduo}_3 \\ \vdots \\ \text{indivíduo}_N \end{matrix}$$

$$\text{População}_{\text{real}} = \begin{bmatrix} 5,3456 & 11,356 & 0,8795 & \dots & -0,652 \\ -98,52 & 3,7841 & 3,6987 & \dots & 11,698 \\ 8,9874 & 5,9875 & -1,698 & \dots & 98,654 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1,5124 & -9,785 & 0,9874 & \dots & 0,0045 \end{bmatrix} \begin{matrix} \text{indivíduo}_1 \\ \text{indivíduo}_2 \\ \text{indivíduo}_3 \\ \vdots \\ \text{indivíduo}_N \end{matrix}$$

Fonte: (HAUPT; WERNER, 2007).

pela função aptidão recebendo uma pontuação baseada no resultado da avaliação, assim o pior indivíduo recebe menor pontuação e o melhor indivíduo maior pontuação. A seguir a tabela 2 apresenta algumas técnicas para as atribuições de aptidão (MATHWORKS, 2004).

Tabela 2: Atribuição da função aptidão.

Atribuição da função de aptidão		
Rank	A população é ordenada de acordo com os valores da função objetivo e o valor de aptidão atribuído para cada indivíduo, dependendo apenas de sua posição no ranking.	Top Atribuição de valores escalares positivos a indivíduos, a cada indivíduo que produza um descendente são atribuídos valores escalares idênticos, enquanto ao resto se atribui o valor zero.
Proporcional	Faz com que o valor de aptidão atribuído para cada indivíduo seja proporcional ao valor da função objetivo.	Mudança Linear Lineariza valores de aptidão dando a expectativa do indivíduo mais apto ser igual a uma constante multiplicada pela pontuação média.

Fonte: (MATHWORKS, 2004).

3.1.6 Processo de seleção

Elabora-se um mecanismo que transmita a hereditariedade de cada indivíduo nas populações seguintes preservando suas boas características, processo que é chamado de seleção. Baseado no princípio natural de sobrevivência dos indivíduos mais aptos, ou seja,

indivíduos com melhor aptidão recebem uma maior probabilidade de serem selecionados para a reprodução e assim gerar melhores descendentes para a próxima geração.

Neste processo de seleção é importante e necessário que os indivíduos com menor aptidão não sejam totalmente descartados a fim de evitar a convergência genética, onde os indivíduos se tornam cada vez mais semelhantes perdendo assim a diversidade da população. Existem vários métodos para selecionar os indivíduos, a seguir são apresentados alguns desses métodos.

□ Método da roleta

Proposto inicialmente por (HOLLAND, 1975), este método ainda hoje é muito utilizado apesar de apresentar algumas desvantagens. Neste método cada indivíduo da população é representado na roleta proporcionalmente ao seu índice de aptidão, assim, os indivíduos com alta aptidão recebem uma porção maior da roleta, enquanto que os de baixa aptidão ocuparão uma porção relativamente menor. Desse modo a roleta é girada um número determinado de vezes, dependendo do tamanho da população, e indivíduos que ocupem uma maior área na roleta possuirão uma maior probabilidade de serem selecionados para reprodução.

Segundo (MICHALEWICZ, 2013), deve-se realizar o cálculo da probabilidade de seleção de um indivíduo da população da seguinte forma:

$$f_i = f(x_i) \rightarrow P_i = \frac{f_i}{\sum_{i=1}^N f_i} \quad (15)$$

Onde:

f_i : é o valor da função aptidão de cada indivíduo.

x_i : é o indivíduo ou solução.

P_i : é a probabilidade do i -ésimo indivíduo da população.

N : é o tamanho da população.

A desvantagem deste método segundo (HAUPT; WERNER, 2007), é que a probabilidade deve ser recalculada a cada geração, e se a taxa de mutação for baixa, nas gerações posteriores todos os indivíduos terão aproximadamente a mesma probabilidade de ser selecionado, diminuindo a diversidade da população. Esta falha pode ocasionar uma convergência prematura do AG para uma solução não almejada.

A título de exemplo, a tabela 3 e figura 15 ilustram o processo de seleção pelo método da roleta, mostrando os valores da função aptidão e indicando as probabilidades de cada indivíduo a serem selecionados.

Tabela 3: Estatística do processo de seleção.

	Indivíduo(x_i)		Aptidão	Probabilidade	Posição do indivíduo selecionado
	Codificação binária	Codificação real	$f(x_i)$	P_i	
x_1	10100110	7,85043	4,34	16%	3°
x_2	10010101	-2,34526	0,25	1,5%	5°
x_3	10100110	7,85043	4,34	7%	4°
x_4	10100110	7,85043	4,34	48%	1°
x_5	10100110	7,85043	4,34	27,5%	2°

Fonte: (HAUPT; WERNER, 2007).

Figura 15: Representação do método da roleta.

Fonte: (HAUPT; WERNER, 2007).

❑ Método estocástico uniforme

O método estocástico uniforme mapeia os indivíduos em segmentos contínuos de uma linha, de tal forma que cada indivíduo corresponda a um segmento de tamanho proporcional ao seu valor de aptidão, da mesma forma que o método da roleta a diferença que ponteiros igualmente espaçados são colocados sobre uma linha. A título de exemplo a figura 16 ilustra o processo de seleção usando este método.

Figura 16: Amostragem do método estocástico uniforme.

Fonte: Autor.

Seja N_{ponteiro} o número de indivíduos a serem selecionados e $1/N_{\text{ponteiro}}$ a distância entre os ponteiros, a posição do primeiro ponteiro é dada pelo número aleatório gerado na faixa de $[0 \rightarrow 1/N_{\text{ponteiro}}]$. Para o exemplo mostrado pela figura 16, é considerado 6 indivíduos a serem selecionados, a distância entre os ponteiros será de $1/6 = 0,167$, e a posição do ponteiro será um número aleatório escolhido na faixa de $[0 \rightarrow 0,167]$, de forma aleatória é escolhida a posição a partir de 0,1.

Dando início a escolha de indivíduos a partir de 0,1 e com distância entre ponteiros de 0,167, os indivíduos escolhidos para reproduzir são: os indivíduos 1, 2, 3, 4, 6 e 8.

□ Método por torneio

Este método realiza a seleção com a finalidade de promover um torneio em um grupo de x indivíduos selecionados aleatoriamente da população ($x \geq 2$). O indivíduo que vencer este torneio, normalmente é o indivíduo que possui o maior valor de aptidão no grupo, é selecionado enquanto os demais indivíduos são descartados. O processo de seleção termina quando se realiza uma quantidade de torneios iguais ao tamanho da população. A diferença de outros métodos de seleção, é que não se baseia na competição de todos os indivíduos da população, mas sim em um subconjunto dela obtendo uma implementação computacional muito simples com apresentação de bons resultados. As vantagens deste método é que não acarreta convergência prematura, combate à estagnação, não há necessidade de esforço computacional extra como ordenamento, não há necessidade de avaliação explícita da aptidão sendo o mais indicado e recomendado por (BLICKLE; THIELE, 1995).

Figura 17: Esquema de seleção pelo método por torneio.

Fonte: Autor.

3.1.7 Operadores genéticos

É através destes operadores genéticos que os indivíduos se reproduzirão e sofrerão alterações obtendo assim novos indivíduos e novas populações. O princípio básico dos operadores genéticos é transformar a população através de sucessivas gerações para obter um resultado satisfatório no final do processo do AG, deste modo eles são extremamente necessários para que a população se diversifique e mantenha as características de adaptação adquiridas pelas gerações anteriores. Os AG são constituídos de dois operadores genéticos chamados de cruzamento e mutação. A seguir são apresentados cada um deles para o seu devido uso por codificação binária e/ou real.

□ Cruzamento

Esta operação é chamada de cruzamento se a codificação da população é binária e chamada de recombinação quando a codificação da população é por ponto flutuante ou real. Este operador genético é um dos principais operadores do AG o qual reproduz em um ambiente computacional o comportamento evolutivo que ocorre na natureza, pois permite que os indivíduos mais aptos que já foram selecionados agora compartilhem a sua codificação com outros indivíduos gerando novos descendentes e criando assim uma diversidade (SRINIVAS; PATNAIK, 1994). A principal função desse operador é assegurar a troca de material genético entre dois indivíduos chamados pais, combinando assim informações de maneira que exista uma probabilidade razoável dos novos indivíduos produzidos, chamados de filhos, serem melhores que seus pais. Escolhe-se uma taxa de cruzamento (T_C) a qual determina a frequência que o indivíduo é invocado.

Diferentes técnicas de cruzamento são propostas na literatura, algumas delas envolvendo mais de um ponto de corte. Segundo (GOLBERG, 1989) o aumento indiscriminado do número de pontos de corte degrada o desempenho do algoritmo, por causar a destruição de possíveis blocos construtivos. A seguir, são apresentadas as diferentes técnicas de cruzamento e/ou recombinação.

– Cruzamento para uma codificação binária

No processo de cruzamento binário apenas partes dos indivíduos são trocadas. Dependendo do número de partes, os indivíduos são divididos antes da troca, através da determinação do número de pontos de cruzamento. Dois indivíduos são fisicamente alinhados ocorrendo ruptura em uma ou mais posições sobre cada indivíduo, fragmentos de indivíduos homólogos são trocados antes da quebra ser reparada, isto resulta um cruzamento de material genético que contribui para variabilidade na população. No processo de cruzamento de variáveis binárias, apenas partes dos indivíduos são trocadas, dependendo do número de

partes, os indivíduos são divididos antes da troca através da determinação do número de pontos de cruzamento.

- * **Cruzamento de um ponto e dois pontos:** os indivíduos são agrupados em pares, e cada par selecionado é particionado em um ponto chamado ponto de cruzamento que é escolhido aleatoriamente. É a partir desse ponto que as informações genéticas dos progenitores são trocadas gerando dois novos descendentes, sendo que um dos descendentes recebe parte genética de cada um dos progenitores e o outro descendente recebe as partes restantes dos progenitores. O cruzamento de dois pontos segue a mesma idéia embora tenham que ser escolhidos aleatoriamente dois pontos de cruzamento dentro do limite do indivíduo. A figura 18 ilustra as técnicas de cruzamento de um ponto e dois pontos aplicados sobre um par de indivíduos com uma variável de doze bits.

Figura 18: (a) Cruzamento de um ponto, (b) Cruzamento de dois pontos.

Fonte: Autor.

- * **Cruzamento de n pontos:** esta técnica de cruzamento implementada por (SPEARS; JONG, 1990) foi generalizada a partir do conceito de cruzamento de um ponto, fazendo do número de pontos de cruzamento um parâmetro. A idéia por trás é que a natureza destrutiva do cruzamento de “n” pontos pareça encorajar a exploração do espaço de busca, não favorecendo a convergência prematura efetuando assim uma busca mais robusta. No entanto, não há consenso sobre as vantagens e desvantagens de usar valores para $n \geq 3$.
- * **Cruzamento uniforme:** este tipo de cruzamento cria uma máscara aleatória de bits do tamanho equivalente ao dos indivíduos progenitores. O primeiro descendente é formado de tal forma que quando a máscara tiver bit igual a um, este descendente herda o bit do primeiro progenitor, e quando a máscara tiver o bit igual à zero o mesmo herda o bit do segundo progenitor. Para formar o segundo descendente o processo ocorre de modo inverso. Esta técnica foi introduzida por (SYSWERDA, 1989).

Figura 19: Cruzamento uniforme.

Fonte: Autor.

– Recombinação para uma codificação por ponto flutuante ou real

Para uma população com indivíduos codificados por ponto flutuante ou real não é possível utilizar o mesmo operador genético de cruzamento utilizado na codificação binária. Será necessário projetar estratégias para simular tal cruzamento, desta vez chamado recombinação. Conforme (HAUPT; HAUPT, 2004) são apresentadas as diferentes técnicas de recombinação utilizadas para este tipo de codificação.

- * **Recombinação discreta:** esta recombinação embaralha os valores das variáveis reais entre os indivíduos que vão se reproduzir sendo chamados de progenitores, produzindo assim um descendente. Esta recombinação especifica os pesos dos progenitores mediante um único parâmetro chamado β que é um número aleatório na faixa de $0 \leq \beta \leq 1$, podendo ser um escalar ou um vetor linha de comprimento igual ao número de variáveis. A função que cria os descendentes a partir dos progenitores é apresentada pela equação 16 conforme (HAUPT; WERNER, 2007).

$$\begin{aligned} Descendente_1 &= (\beta) \cdot Progenitor_1 + (1 - \beta) \cdot Progenitor_2 \\ Descendente_2 &= (1 - \beta) \cdot Progenitor_1 + (\beta) \cdot Progenitor_2 \end{aligned} \quad (16)$$

- * **Recombinação linear:** segundo (WRIGHT, 1991) mediante esta recombinação obtêm-se descendentes não limitados pelos valores dos progenitores criando assim três novos descendentes, sendo escolhidos apenas os dois melhores. A função que cria os três descendentes é a mesma usada pela recombinação discreta. A equação 17 mostra a criação destes descendentes usando $\beta = 0,5$.

$$\begin{aligned} Descendente_1 &= (0,5) \cdot Progenitor_1 + (0,5) \cdot Progenitor_2 \\ Descendente_2 &= (1,5) \cdot Progenitor_1 - (0,5) \cdot Progenitor_2 \\ Descendente_3 &= (-1,5) \cdot Progenitor_1 + (0,5) \cdot Progenitor_2 \end{aligned} \quad (17)$$

- * **Recombinação heurística:** a recombinação heurística também usa os pesos dos progenitores através do parâmetro β , embora desta vez seja estabelecido um valor definido de $\beta = 1.2$, permitindo também a criação de descendentes fora da faixa permitida pelos progenitores. Algumas vezes a criação desses descendentes pode ficar fora da faixa permitida pelo problema. Caso isso aconteça, o descendente criado é descartado e o algoritmo procura outro valor de β .

$$\begin{aligned} Descendente_1 &= Progenitor_1 - \beta \cdot (Progenitor_1 - Progenitor_2) \\ Descendente_2 &= Progenitor_1 + \beta \cdot (Progenitor_1 - Progenitor_2) \end{aligned} \quad (18)$$

- * **Recombinação binária simulada:** esta recombinação imita o cruzamento de um ponto usado para uma codificação binária. Inicialmente seleciona aleatoriamente uma variável dentro de cada progenitor que será utilizado como ponto de recombinação, como mostra a equação 19.

$$\begin{aligned} \alpha &= Arredondar \{ Aleatório \cdot N_{var} \} \\ Progenitor_1 &= [Var_1 Prog 1 \quad Var_2 Prog 1 \quad \cdots \quad Var_\alpha Prog 1 \quad \cdots \\ &\quad \cdots \quad Var_{N_{var}} Prog 1] \\ Progenitor_2 &= [Var_1 Prog 2 \quad Var_2 Prog 2 \quad \cdots \quad Var_\alpha Prog 2 \quad \cdots \\ &\quad \cdots \quad Var_{N_{var}} Prog 2] \end{aligned} \quad (19)$$

Onde N_{var} é igual ao número de variáveis de cada progenitor e $0 \leq \beta \leq 10$. O seguinte passo é realizar a recombinação das variáveis selecionadas. A criação das novas variáveis é mostrada pela equação 20.

$$\begin{aligned} Var_{nova Prog 1} &= Var_\alpha Prog 1 - \beta \cdot (Var_\alpha Prog 1 - Var_\alpha Prog 2) \\ Var_{nova Prog 2} &= Var_\alpha Prog 2 + \beta \cdot (Var_\alpha Prog 1 - Var_\alpha Prog 2) \end{aligned} \quad (20)$$

Como passo final, será completada a recombinação substituindo as novas variáveis criadas por cada um dos progenitores, formando assim seus novos descendentes:

$$\begin{aligned} Descendente_1 &= [Var_1 Prog 1 \quad Var_2 Prog 1 \quad \cdots \quad Var_{nova Prog 1} \quad \cdots \\ &\quad \cdots \quad Var_{N_{var}} Prog 1] \\ Descendente_2 &= [Var_1 Prog 2 \quad Var_2 Prog 2 \quad \cdots \quad Var_{nova Prog 2} \quad \cdots \\ &\quad \cdots \quad Var_{N_{var}} Prog 2] \end{aligned} \quad (21)$$

Este tipo de recombinação foi desenvolvido por (ESHELMAN; SCHAFFER, 1993). Vale ressaltar que esta recombinação não permite descendentes com valores fora dos limites estabelecidos pelos progenitores a menos que $\beta \geq 1$.

❑ Mutação

Segundo (MICHALEWICZ, 2013), consiste em modificar a estrutura genética dos indivíduos de forma aleatória, alterando uma posição na cadeia de informações do indivíduo, diversificando assim a população e evitando uma convergência prematura do algoritmo para um ótimo local. Além disso, segundo (SRINIVAS; PATNAIK, 1994), a mutação é um operador secundário, porém decisivo no AG, pois atua quando os processos de seleção e cruzamento ou recombinação geram uma homogeneização da população, podendo restaurar o material genético perdido em gerações anteriores.

– Mutação para uma codificação binária

Consiste apenas na mudança do valor de bit, ou seja, a posição escolhida aleatoriamente do bit 1 será trocada pelo bit 0 e vice-versa dependendo da taxa de mutação (T_m). A figura 20 apresenta o processo de mutação para um indivíduo com uma variável de 12 bits, sendo aplicado no ponto de mutação com fila 1 e coluna 7 do indivíduo.

Figura 20: Mutação por troca de bit para codificação binária.

Fonte: Autor.

– Mutação para uma codificação por ponto flutuante ou real

A mutação para codificação real é usada para causar perturbações aos valores das variáveis ou para seleção randômica de valores novos dentro da faixa permitida. De acordo com (WRIGHT, 1991) e (MICHALEWICZ, 2013), a mutação para codificação real possui maior vantagem com altas taxas de mutação em comparação com a mutação binária que utiliza menores taxas de mutação, aumentando assim o nível de possibilidade de exploração do espaço de busca sem afetar as características de convergência, apresentando melhores soluções que o método tradicional binário. A seguir são apresentados alguns tipos de mutação (MATHWORKS, 2004).

- * **Mutação Gaussiana:** a mutação gaussiana adiciona um número aleatório a partir da distribuição gaussiana com média igual a zero para cada entrada do vetor progenitor. O desvio padrão da distribuição é determinado pelos parâmetros “Scale” e “Shrink”. O parâmetro “Scale” determina o desvio padrão na primeira geração. Se o limite inicial é definido como um vetor “V” de duas filas e uma coluna, o desvio padrão inicial é dado pela

equação 22, sendo o mesmo em todas as coordenadas do vetor progenitor. Para o caso que o dimensionamento do vetor for de duas filas e número de variáveis como coluna, o desvio padrão inicial na coordenada “i” será dada pela equação 23.

$$\sigma_1 = Scale \cdot (V_{(2)} - V_{(1)}) \quad (22)$$

$$\sigma_{1,i} = Scale \cdot (V_{(i,2)} - V_{(i,1)}) \quad (23)$$

O parâmetro “Shrink” controla como o desvio padrão se reduz com o passar das gerações, se o limite inicial for um vetor de dimensão duas filas e uma coluna, o desvio padrão na k -ésima geração (σ_k), é dado pela equação 24 sendo a mesma em todas as coordenadas do vetor progenitor. E se o dimensionamento do vetor for duas filas e número de variáveis como coluna, o desvio padrão na coordenada “i” do vetor progenitor na k -ésima geração (σ_k, k), é dado pela equação 25.

$$\sigma_k = \sigma_{k-1} \cdot \left(1 - Shrink \cdot \frac{k}{Gerações} \right) \quad (24)$$

$$\sigma_{i,k} = \sigma_{i,k-1} \cdot \left(1 - Shrink \cdot \frac{k}{Gerações} \right) \quad (25)$$

- * **Mutação Uniforme:** a mutação uniforme é um processo de duas etapas. Na primeira etapa o algoritmo seleciona uma porção das variáveis de um vetor indivíduo para a mutação onde cada variável possui uma probabilidade de ser mutada chamado de taxa de mutação T_m . Na segunda etapa o algoritmo substitui cada variável selecionada por um número aleatório, selecionado uniformemente a partir do limite das variáveis, o valor padrão de T_m é 0,01.

3.1.8 Parâmetros e estratégia utilizados pelos algoritmos genéticos

O bom funcionamento dos AG depende da utilização correta de parâmetros que o controlam e das estratégias que aprimoram o seu desempenho. A seguir descrevem-se as definições dos diferentes parâmetros de controle e estratégia utilizados no desenvolvimento do AG.

□ Parâmetros de controle

De forma a orientar o funcionamento do algoritmo genético apresentamos as definições de alguns parâmetros de controle.

– **Tamanho da população** (N_p)

O tamanho da população indica o número de indivíduos em cada população que normalmente é constante durante a evolução. De acordo com (LINDEN, 2012), este parâmetro pode afetar o desempenho global e a eficiência dos AG porque se o tamanho da população for muito pequeno o desempenho pode cair, pois a população fornecerá uma pequena cobertura do espaço de busca diminuindo as possibilidades de se atingir o ótimo global, além de perder a diversidade necessária e não convergir para uma boa solução. Por outro lado uma população grande apresenta maior diversidade e geralmente fornece uma cobertura representativa do domínio do problema, além de prevenir convergências prematuras para soluções locais. Entretanto, o algoritmo poderá perder grande parte de sua eficiência pela demora na avaliação de toda a população a cada iteração, sendo necessário trabalhar com maiores recursos e tempo computacional.

– **Taxa de cruzamento** (T_C)

Este parâmetro é um valor percentual indicando a probabilidade de quantos indivíduos selecionados da população experimentaram o operador de cruzamento. Quanto maior for o valor da taxa mais rapidamente novas estruturas serão introduzidas na população. Em contrapartida estruturas com boas aptidões poderão ser retiradas mais rapidamente da população ocorrendo perda de estruturas de alta aptidão, e se o valor da taxa for muito baixo pode-se tornar a convergência do algoritmo muito lenta.

– **Taxa de mutação** (T_m)

Este parâmetro é um valor percentual indicando a probabilidade de quantos indivíduos passaram pelo operador de mutação. Uma baixa taxa de mutação previne que uma dada população fique estagnada em um valor não proporcionando aos objetivos da mutação. No entanto deve-se tomar cuidado em utilizar uma taxa de mutação muito alta, pois isto pode tornar a busca essencialmente aleatória.

□ Critérios de parada

O critério de parada é o parâmetro que indica quando o algoritmo deve encerrar o processo de busca. Na prática, vários critérios de parada podem ser implementados sendo os estáticos, que são os previamente especificados, e os dinâmicos que dependem da evolução do processo. A tabela 4 apresenta alguns critérios de parada conforme (MATHWORKS, 2004).

□ Estratégia do elitismo

Com o objetivo de aumentar a velocidade de convergência do AG, preservar e utilizar as melhores soluções encontradas numa geração atual para as próximas gerações

Tabela 4: Definições dos critérios de parada para os AG.

	Crítérios de Parada
Gerações (<i>Generations</i>)	Número máximo de gerações onde o algoritmo genético encerra o processo de busca quando um dado número de gerações previamente estipulado for atingido.
Tempo Limite (<i>Time Limit</i>)	Especifica o tempo máximo de processamento que deve ser atingido. A unidade é segundos.
Aptidão Limite (<i>Fitness Limit</i>)	O algoritmo pára o processo de busca quando é obtido um valor de aptidão pré-estabelecido.
Paralisação por Gerações (<i>Stall Gen Limit</i>)	Se a variação média ponderada do valor da função aptidão não melhora durante um número específico de gerações, o algoritmo encerra o processo de busca.
Paralisação por Tempo Limite (<i>Stall Time Limit</i>)	Se não houver melhoria no melhor valor de aptidão para um intervalo de tempo específico, o processo de busca é encerrado.
Função de Tolerância (<i>Tol Fun</i>)	O algoritmo é executado até que a alteração cumulativa no valor de função aptidão sobre a paralisação por gerações seja menor ou igual que a função tolerância pré-estabelecida.
Tolerância de Restrições não Lineares (<i>Tol Con</i>)	A tolerância de restrições não lineares é utilizada para determinar a viabilidade em relação às restrições não lineares.

Fonte: (MATHWORKS, 2004).

surge o conceito de elitismo. Esta estratégia elitista visa preservar indivíduos com altos valores de aptidão, ou seja, as melhores soluções encontradas na geração presente são copiadas integralmente sem alterações para a geração seguinte, garantindo assim que estes indivíduos não sejam destruídos pelos operadores genéticos. A principal vantagem desta estratégia está na garantia de convergência, ou seja, caso o ótimo global seja descoberto durante o processo de busca o AG deve convergir para esta solução.

3.2 Busca padrão (*Pattern Search*)

O método de busca padrão (*Pattern Search*) pertence a um subconjunto dos métodos de busca direta (*Direct Search*) como ilustrado inicialmente na figura 9. Este método foi originalmente proposto por (HOOKE; JEEVES, 1961). Posteriormente, foi apresentada uma generalização denominada *Generalized Pattern Search* (GPS) por (TORCZON, 1997)

desenvolvendo uma teoria de convergência global.

No método, podem-se utilizar vetores de direção fixos ou variáveis, a escolha diferencia o algoritmo GPS do algoritmo Mesh Adaptive Search (MADS). Este último não será utilizado neste trabalho.

3.2.1 Estrutura básica do *Pattern Search*

Este tipo de método analisa a função objetivo em determinados pontos para decidir qual deles será a aproximação seguinte para a otimização. A partir de um ponto “ x ”, os pontos são determinados seguindo um padrão de direções e certo tamanho de malha “ Δm ”, formando um conjunto de “ n ” soluções. A seguir a figura 21 ilustra o pseudocódigo do GPS.

Figura 21: Pseudocódigo da estrutura básica do GPS.

Início

Enquanto Critério de parada não satisfeito **faça**

Gera conjunto de soluções “ n ” – Malha e procura um ponto melhor “ x ”

Se não houve melhora **então**

Escolha um conjunto de direções e se torna conjunto atual

Fim se

Se houve melhora **então**

Encontrou-se a solução melhor, configura “ $\Delta^{m+k} > \Delta^m$ ”.

Senão

Utiliza a mesma solução, configura “ $\Delta^{m+k} < \Delta^m$ ”.

Fim se

Fim Enquanto

Fim

Fonte: Autor.

A figura 22 ilustra o fluxograma do processamento iterativo do *Pattern Search*, mostrando que o método específico de otimização GPS só faz uso do valor da função de forma comparativa, não precisando avaliar numericamente o valor da função, mas sim apenas avaliar se a solução é melhor ou pior que o valor atual.

Os passos deste processo iterativo é muito simples, consiste em calcular uma sequência de soluções que se aproximam iterativamente da solução global. A cada iteração o algoritmo seleciona um conjunto de soluções chamado de malha (*mesh*), próximo da solução atual, sendo esta malha formada pelo acréscimo da solução atual multiplicado por um conjunto de vetores denominado padrão (*pattern*). Na sequência é realizada uma análise das soluções, ou seja, uma análise dos pontos da malha atual chamada de votação (*poll*).

Figura 22: Fluxograma do processamento do GPS.

Fonte: Autor.

Quando a votação encontra um ponto na malha que melhora o valor da função objetivo, esta é considerada bem-sucedida e este ponto se torna a referência atual para a próxima iteração do algoritmo. Nesse caso a distância de busca é aumentada por um fator pré-definido para a próxima iteração. Se não encontrar uma solução com melhor avaliação, a votação é considerada malsucedida e a solução permanece a mesma para a próxima iteração, e a distância de busca é reduzida por um fator pré-definido para a próxima iteração, retornando ao processo de iteração até um critério de parada seja atingido.

3.2.2 Terminologia do *Pattern Search*

Após ter estruturado o esquema básico de processamento da (GPS), a seguir realizaremos uma descrição de cada terminologia utilizada por este método segundo (MATHWORKS,

2004).

□ Padrão (*Pattern*)

É um conjunto de vetores “ V_i ” que o algoritmo de busca padrão usa para determinar que pontos possíveis ou soluções possíveis sejam utilizados para a busca em cada iteração. Esse vetor é definido pelo número de variáveis independentes “ N ” da função objetivo e um conjunto de base positivo. Comumente são utilizados dois conjuntos de bases positivas no método de busca padrão, que são a base máxima com “ $2N$ ” vetores e a base mínima com “ $N + 1$ ” vetores.

Para a (GPS), a coleção dos vetores que o padrão utiliza são vetores com direção fixa, para a busca de malha adaptativa (MADS), a coleção dos vetores que o padrão utiliza são selecionados randomicamente pelo método.

□ Malha (*Mesh*)

Em cada passo, o método de busca padrão procura um conjunto de pontos que será chamado de malha (*mesh*) e que melhora a função objetivo. Tanto no método de GPS quanto no método de MADS é formada a malha da seguinte maneira: no primeiro passo é gerado um conjunto de vetores “ d_i ” a partir da multiplicação de cada vetor padrão “ V_i ” pelo escalar “ Δ^m ” chamado de tamanho de malha; no segundo passo é adicionar o ponto que encontra o melhor valor da função objetivo do passo anterior.

□ Votação (*Polling*)

A cada iteração é realizada uma votação dos pontos da malha atual, calculados pelos valores da função objetivo, essa votação é parada logo que se encontre um ponto melhor cujo valor da função objetivo seja menor que o valor do ponto atual, denominando que a votação foi bem-sucedida e o ponto encontrado torna-se um ponto atual na seguinte iteração. Se não consegue encontrar um ponto que melhore a função objetivo, diz-se que a votação não teve sucesso e o ponto atual continua sendo o mesmo na próxima iteração.

3.2.3 Critérios de Parada

Os critérios de parada normalmente utilizados no método de busca padrão (*Pattern Search*) encontram-se em (MATHWORKS, 2004). A seguir são apresentados na tabela 5 alguns critérios de parada utilizados neste trabalho.

Tabela 5: Critérios de parada para o *Pattern Search*.

Critérios de Parada	
Tolerância da Malha (<i>Tol Mesh</i>)	Especifica o mínimo de tolerância para o tamanho da malha. O algoritmo encerra o processo quando o tamanho da malha é menor que o indicado.
Máximo de Iterações (<i>Max Iter</i>)	Especifica o número máximo de iterações que o algoritmo realiza. É encerrado o processo se o número de iterações excede ao indicado.
Máximo da função de Avaliação (<i>Max Fun Eval</i>)	Indica o número máximo de avaliações da função objetivo. O algoritmo encerra o processo se o número de avaliações é excedido.
Tempo Limite (<i>Time Limit</i>)	Especifica o tempo máximo de processamento que deve ser atingido. A unidade é segundos.
Tolerância de Vínculo (<i>Tol Bind</i>)	Especifica o mínimo de tolerância da distância entre o ponto atual e o limite da região fatível.
Função de Tolerância (<i>Tol Fun</i>)	Indica o mínimo de tolerância para a função objetivo. Depois da votação bem-sucedida, se a diferença entre o valor da função com o melhor ponto e o valor da função com o ponto anterior é menor que o valor de tolerância da função, o processo do algoritmo é encerrado.

Fonte: (MATHWORKS, 2004).

3.3 Diferenças entre os métodos heurísticos e os métodos clássicos de otimização

Uma das maiores preocupações no desenvolvimento de um algoritmo de otimização é a robustez, que é o balanço entre a eficiência dada pela rapidez, e a eficácia, que é dada pela convergência para uma solução global. Os métodos clássicos, chamados métodos determinísticos, iniciam-se com um único candidato a possível solução, chamada de solução básica. Pelo cálculo de derivadas se determina para qual direção se deve encaminhar a busca do próximo candidato, porém, não existe nenhuma garantia da obtenção de um ponto extremo global, pois o algoritmo convergirá para o extremo local mais próximo da direção de busca. Por esta razão, os métodos determinísticos são mais convenientemente empregados para problemas unimodais, que apresentam apenas um extremo no intervalo considerado, pois a aplicação destes métodos para problemas multimodais não é tão simples, já que a solução encontrada dependerá do ponto de partida inicial, podendo na maioria das vezes encontrar uma solução extrema local pior que a solução ótima global.

desconhecida.

De acordo com (GILLI; WINKER, 2008), os métodos heurísticos apresentam as seguintes diferenças em relação aos métodos determinísticos:

- ❑ Procuram uma população de pontos que obtenha o maior ou menor valor possível para a função objetivo do problema e não apenas um único ponto isolado, aumentando assim a possibilidade de encontrar uma solução ótima global e não um ótimo local.
- ❑ Utilizam informações sobre o problema com a função objetivo a ser maximizada ou minimizada ao invés de cálculo de derivadas, não necessitando de algum tipo de informação do gradiente.
- ❑ Usam operadores probabilísticos e não regras determinísticas, característica que os distingue como ferramenta para guiar a busca em direção a regiões do espaço com prováveis melhorias.
- ❑ Trabalham com a codificação de um conjunto de possíveis soluções ao invés de soluções propriamente ditas, tendo a capacidade de explorar as similaridades de codificação das estruturas para guiar a busca no espaço de soluções, o que torna o método mais flexível.

3.4 Vantagens e desvantagens dos métodos heurísticos

A utilização dos métodos heurísticos em problemas de otimização é baseada principalmente na codificação do problema, função objetivo e o espaço de busca associado ao problema. Os métodos heurísticos endereçam estas três características para a solução do problema de maneira muito simples se comparados com outros métodos clássicos determinísticos, apresentando as seguintes vantagens e desvantagens conforme (GILLI; WINKER, 2008):

- ❑ Vantagens em se utilizar os métodos heurísticos:
 - São muito robustos e apresentam bons resultados em espaços de busca complexos sendo aplicáveis a uma grande variedade de problemas.
 - Não necessitam de funções deriváveis nem requerem informações dos gradientes da superfície definida pela função objetivo.
 - É possível executá-lo utilizando técnicas de processamento paralelo que tendem a melhorar tanto a eficiência quanto a qualidade das soluções obtidas.

- São mais resistentes a se prenderem a ótimos locais procurando como objetivo principal o ótimo global obtendo soluções para problemas de otimização multidimensionais complexos.
- É computacionalmente simples e apresenta baixo custo de implementação, além de proporcionar maior flexibilidade no tratamento do problema.
- É viável para construção de sistemas híbridos, podendo ser associado a outros métodos para o aprimoramento de resultados.

□ Desvantagens da utilização dos métodos heurísticos:

- No processo de busca pode-se requerer um grande número de avaliações, o que acarreta mais recursos computacionais, portanto, maior tempo de execução.
- A escolha das técnicas e configurações de cada algoritmo heurístico pode complicar a resolução do problema tratado, visto que a implementação é feita de maneira empírica, dependendo da experiência do usuário e domínio do problema.
- Por se tratar de um método probabilístico na busca de soluções ótimas, não há garantia de convergir para o ótimo global.

Desenvolvimento da metodologia proposta e configuração das ferramentas de otimização

Algoritmos de localização de faltas têm sido desenvolvidos com o objetivo de melhorar a precisão nos resultados, e neste capítulo apresenta-se o desenvolvimento da metodologia proposta e as configurações das ferramentas de otimização utilizadas neste trabalho, com o fim de elaborar um algoritmo preciso e robusto para fornecer informações mais confiáveis para a concessionária. Inicialmente apresenta-se o desenvolvimento da metodologia proposta para a localização de faltas, e o fluxograma ilustrado pela figura 23 mostra a sequência de passos realizados no desenvolvimento da metodologia utilizada.

Figura 23: Fluxograma da metodologia utilizada para localização de faltas.

Fonte: Autor.

Conforme a figura 23, o desenvolvimento da metodologia proposta inicia-se como primeiro passo, com a modelagem dos sistemas de transmissão a serem simulados, de maneira que seja representada o mais próxima da situação real. Nesse contexto, a metodologia proposta é baseada no equacionamento trifásico. Na sequência o segundo passo é realizar a leitura das amostras de tensões e correntes de pré e pós-falta, utilizando apenas medições do terminal local da linha de transmissão, sendo calculados os fasores dos mesmos por meio da TDF. Como terceiro passo será necessário identificar o tipo de falta e as fases envolvidas no momento de ocorrência da falta. No quarto passo é elaborado o algoritmo proposto para a localização de faltas, e como quinto passo é definida a função objetivo a ser otimizada pelas ferramentas de otimização para finalmente encontrar a distância estimada da falta.

4.1 Modelagem do sistema de transmissão

4.1.1 Modelagem de linhas de transmissão

Neste item 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. Considerando que o método de localização de faltas proposto neste trabalho é baseado em grandezas fasoriais associadas à frequência fundamental, a modelagem da linha de transmissão torna-se um fator importante no que se refere à precisão da localização da falta. Por essa razão, o algoritmo de localização de faltas desenvolvido considera que os parâmetros da linha de transmissão, resistência, indutância e capacitância, são distribuídos uniformemente ao longo do seu comprimento, levando em conta condutância desprezível ($G = 0$). Na figura 24, representa-se uma linha de transmissão monofásica equivalente constituída por seções infinitesimais de comprimento ∂x .

Figura 24: Parâmetros distribuídos para um comprimento ∂x de uma linha monofásica.

Fonte: (DOMMEL, 1997).

A queda de tensão por unidade de comprimento é dada por:

$$-\frac{\partial v}{\partial x} = R \cdot i + L \cdot \frac{\partial i}{\partial t} \quad (26)$$

E o decréscimo de corrente por unidade de comprimento é dado por:

$$-\frac{\partial i}{\partial x} = G \cdot v + C \cdot \frac{\partial v}{\partial t} \quad (27)$$

Na forma fasorial tem-se:

$$\begin{cases} -\frac{\partial \dot{V}}{\partial x} = (R + j\omega \cdot L) \cdot \dot{I} \\ -\frac{\partial \dot{I}}{\partial x} = (j\omega \cdot C) \cdot \dot{V} \end{cases} \quad (28)$$

Considerando uma linha de transmissão trifásica, se estabelecem as seguintes equações:

$$\begin{cases} \frac{\partial [\dot{V}_{abc}]}{\partial x} = [\bar{z}_{abc}] \times [\dot{I}_{abc}] \\ \frac{\partial [\dot{I}_{abc}]}{\partial x} = [\bar{y}_{abc}] \times [\dot{V}_{abc}] \end{cases} \quad (29)$$

Derivando as equações diferenciais de 29 com relação à x :

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 [\dot{V}_{abc}]}{\partial x^2} = [\bar{z}_{abc}] \times \frac{\partial [\dot{I}_{abc}]}{\partial x} \\ \frac{\partial^2 [\dot{I}_{abc}]}{\partial x^2} = [\bar{y}_{abc}] \times \frac{\partial [\dot{V}_{abc}]}{\partial x} \end{cases} \quad (30)$$

Substituindo as equações diferenciais de 29 em 30, obtém-se:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 [\dot{V}_{abc}]}{\partial x^2} = [\bar{z}_{abc}] \times [\bar{y}_{abc}] \times [\dot{V}_{abc}] \\ \frac{\partial^2 [\dot{I}_{abc}]}{\partial x^2} = [\bar{y}_{abc}] \times [\bar{z}_{abc}] \times [\dot{I}_{abc}] \end{cases} \quad (31)$$

4.1.1.1 Cálculo de parâmetros da linha de transmissão

Tradicionalmente, efetua-se o cálculo dos parâmetros da linha de transmissão através de ferramentas computacionais, as quais são baseadas em conceitos de eletromagnetismo,

informações da geometria da linha e em dados de fabricante dos condutores (DOMMEL, 1986). No entanto, o cálculo dos elementos das matrizes de impedância série e admitância paralela $[\bar{z}_{abc}]$ e $[\bar{y}_{abc}]$, respectivamente, possui imprecisões em virtude de depender de diversos fatores como: superfície do solo não plana e homogênea, configuração geométrica exata da linha relativamente complexa para efeitos de definição dos campos eletromagnéticos, estrutura das torres, número e espaçamento dos condutores por fase, comprimento da flecha criada no vão da torre, resistividade do solo, transposição ou não da linha, tornando-se ainda mais complexa a análise para circuitos duplos (HESSE, 1963).

Conforme a figura 25, apresenta-se uma linha de transmissão trifásica. Definindo $[P] = [\bar{z}_{abc}] \times [\bar{y}_{abc}]$ e $[Q] = [\bar{y}_{abc}] \times [\bar{z}_{abc}]$, as soluções das equações diferenciais de segunda ordem da equação 31 são apresentadas pelas equações 32 e 33.

Figura 25: Linha de transmissão trifásica não transposta no domínio de fases.

Fonte: (ZANETTA, 2003).

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial^2}{\partial x^2} \begin{bmatrix} \dot{V}_a \\ \dot{V}_b \\ \dot{V}_c \end{bmatrix} = [P] \times \begin{bmatrix} \dot{V}_a \\ \dot{V}_b \\ \dot{V}_c \end{bmatrix} \\ \frac{\partial^2}{\partial x^2} \begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{bmatrix} = [Q] \times \begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{bmatrix} \end{array} \right. \quad (32)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial^2}{\partial x^2} \begin{bmatrix} \dot{V}_a \\ \dot{V}_b \\ \dot{V}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{z}_{aa} & \bar{z}_{ab} & \bar{z}_{ac} \\ \bar{z}_{ba} & \bar{z}_{bb} & \bar{z}_{bc} \\ \bar{z}_{ca} & \bar{z}_{cb} & \bar{z}_{cc} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \bar{y}_{aa} & \bar{y}_{ab} & \bar{y}_{ac} \\ \bar{y}_{ba} & \bar{y}_{bb} & \bar{y}_{bc} \\ \bar{y}_{ca} & \bar{y}_{cb} & \bar{y}_{cc} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \dot{V}_a \\ \dot{V}_b \\ \dot{V}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{p}_{aa} & \bar{p}_{ab} & \bar{p}_{ac} \\ \bar{p}_{ba} & \bar{p}_{bb} & \bar{p}_{bc} \\ \bar{p}_{ca} & \bar{p}_{cb} & \bar{p}_{cc} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \dot{V}_a \\ \dot{V}_b \\ \dot{V}_c \end{bmatrix} \\ \frac{\partial^2}{\partial x^2} \begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{y}_{aa} & \bar{y}_{ab} & \bar{y}_{ac} \\ \bar{y}_{ba} & \bar{y}_{bb} & \bar{y}_{bc} \\ \bar{y}_{ca} & \bar{y}_{cb} & \bar{y}_{cc} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \bar{z}_{aa} & \bar{z}_{ab} & \bar{z}_{ac} \\ \bar{z}_{ba} & \bar{z}_{bb} & \bar{z}_{bc} \\ \bar{z}_{ca} & \bar{z}_{cb} & \bar{z}_{cc} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{q}_{aa} & \bar{q}_{ab} & \bar{q}_{ac} \\ \bar{q}_{ba} & \bar{q}_{bb} & \bar{q}_{bc} \\ \bar{q}_{ca} & \bar{q}_{cb} & \bar{q}_{cc} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{bmatrix} \end{array} \right. \quad (33)$$

4.1.1.2 Representação da linha de transmissão por quadripolos

A linha de transmissão trifásica ilustrada na figura 25, pode ser representada por quadripolos de transmissão, conforme ilustra-se na figura 26.

Figura 26: Quadripolo representativo de uma linha de transmissão.

Fonte: Autor.

A relação entre as tensões e correntes de ambos os terminais da linha de transmissão dependem da matriz do quadripolo de transmissão $[T_{(x)}]$ que é composta pelos parâmetros $[A_{(x)}]$, $[B_{(x)}]$, $[C_{(x)}]$ e $[D_{(x)}]$, conforme mostrado na seguinte equação.

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{abc}^L \\ \dot{I}_{abc}^L \end{bmatrix} = [T_{(x)}] \times \begin{bmatrix} \dot{V}_{abc}^R \\ \dot{I}_{abc}^R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [A_{(x)}] & [B_{(x)}] \\ [C_{(x)}] & [D_{(x)}] \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \dot{V}_{abc}^R \\ \dot{I}_{abc}^R \end{bmatrix} \quad (34)$$

Ou:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{abc}^R \\ \dot{I}_{abc}^R \end{bmatrix} = [T_{(x)}]^{-1} \times \begin{bmatrix} \dot{V}_{abc}^L \\ \dot{I}_{abc}^L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [A_{(x)}] & [B_{(x)}] \\ [C_{(x)}] & [D_{(x)}] \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \dot{V}_{abc}^L \\ \dot{I}_{abc}^L \end{bmatrix} \quad (35)$$

O cálculo dos parâmetros do quadripolo de transmissão $[A_{(x)}]$, $[B_{(x)}]$, $[C_{(x)}]$ e $[D_{(x)}]$, é detalhado no anexo A deste trabalho, conforme (BOWMAN; MCNAMEE, 1964).

$$\left\{ \begin{array}{l} [A_{(x)}] = [\bar{y}_{abc}]^{-1} \times [M] \times [\cosh(\gamma_j \cdot x)]_d \times [M]^{-1} \times [\bar{y}_{abc}] \\ [B_{(x)}] = [\bar{y}_{abc}]^{-1} \times [M] \times [\gamma_j \cdot \sinh(\gamma_j \cdot x)]_d \times [M]^{-1} \\ [C_{(x)}] = x \cdot [M] \times \left[\frac{\sinh(\gamma_j \cdot x)}{(\gamma_j \cdot x)} \right]_d \times [M]^{-1} \times [\bar{y}_{abc}] \\ [D_{(x)}] = [M] \times [\cosh(\gamma_j \cdot x)]_d \times [M]^{-1} \end{array} \right. \quad (36)$$

Ou:

$$\left\{ \begin{array}{l} [A_{(x)}] = [\bar{z}_{abc}] \times [\bar{y}_{abc}] \times [M] \times [\cosh(\gamma_j \cdot x)]_d \times [M]^{-1} \times [\bar{y}_{abc}]^{-1} \times [\bar{z}_{abc}]^{-1} \\ [B_{(x)}] = [M] \times [\gamma_j \cdot \sinh(\gamma_j \cdot x)]_d \times [M]^{-1} \times [\bar{y}_{abc}]^{-1} \\ [C_{(x)}] = x \cdot [\bar{y}_{abc}] \times [M] \times \left[\frac{\sinh(\gamma_j \cdot x)}{(\gamma_j \cdot x)} \right]_d \times [M]^{-1} \\ [D_{(x)}] = [\bar{y}_{abc}] \times [M] \times [\cosh(\gamma_j \cdot x)]_d \times [M]^{-1} \times [\bar{y}_{abc}]^{-1} \end{array} \right. \quad (37)$$

Onde: $[M]$: são autovetores da matriz $[P] = [\bar{z}_{abc}] \times [\bar{y}_{abc}]$;

γ_j^2 : são autovalores da matriz $[P]$;

$[]_d$: é a notação de uma matriz diagonal.

A metodologia proposta neste trabalho para a localização de faltas utiliza as equações 34, 35 e 36, essa abordagem garante generalidade ao método, aliada à precisão. A partir dos parâmetros do quadripolo de transmissão, podem ser obtidos os parâmetros do modelo π -corrigido ilustrado pela figura 27.

Figura 27: Modelo π -corrigido da linha trifásica.

Fonte: Autor.

Este modelo π -corrigido é também chamado de modelo exato por considerar tanto a capacitância da linha de transmissão quanto por utilizar as funções hiperbólicas, tornando-se um modelo com maior exatidão em comparação a outros modelos, sendo adequado para linhas curtas, médias e longas.

Nesse caso:

$$\begin{cases} [\bar{Y}_L] = [B_{(x)}]^{-1} \times ([D_{(x)}] - [I]) \\ [\bar{Y}_R] = [B_{(x)}]^{-1} \times ([A_{(x)}] - [I]) \end{cases} \quad \begin{cases} [\bar{Z}_\pi] = [B_{(x)}] \\ [A_{(x)}] = [D_{(x)}]^T \end{cases} \quad (38)$$

4.1.2 Modelagem dos sistemas equivalentes de Thévenin

Uma adequada representação dos sistemas equivalentes de Thévenin em cada um dos terminais da linha de transmissão permite determinar com maior precisão a localização da falta. Essa representação pode ser efetuada a partir das potências de curto-circuito monofásica ($S_{CC-1\phi}$) e trifásica ($S_{CC-3\phi}$), apresentadas pelas equações 39 e 40.

$$\bar{Z}_1^{(Positivo)} = \frac{(\dot{V}_L)^2}{(S_{CC-3\phi}^*)} \quad (39)$$

$$\bar{Z}_0^{(Zero)} = \frac{3 \cdot (\dot{V}_L)^2}{(S_{CC-1\phi}^*)} - 2 \cdot (\bar{Z}_1^{(Positivo)}) \quad (40)$$

Visto que o algoritmo proposto é baseado nas componentes de fase, tem-se:

$$\bar{Z}_p = \frac{2 \cdot (\bar{Z}_1^{(Positivo)}) + \bar{Z}_0^{(Zero)}}{3} \quad (41)$$

$$\bar{Z}_m = \frac{\bar{Z}_0^{(Zero)} - \bar{Z}_1^{(Positivo)}}{3} \quad (42)$$

Onde:

$\bar{Z}_p$, $\bar{Z}_m$: são as impedâncias própria e mutua, respectivamente.

$\bar{Z}_1^{positivo}$, $\bar{Z}_0^{zero}$: são as impedâncias de sequência positiva e zero, respectivamente.

$\dot{V}_L$: é a tensão de linha.

Sabendo que, $\bar{Z}_2^{negativo} = \bar{Z}_1^{positivo}$, $a = 1 \angle 120^\circ$ e que $[T]$ é a matriz de transformação, obtêm-se a matriz de componentes de fase do equivalente de Thévenin, conforme a

equação 44.

$$[\bar{Z}_{012}^{Th}] = \begin{bmatrix} \bar{Z}_0 & 0 & 0 \\ 0 & \bar{Z}_1 & 0 \\ 0 & 0 & \bar{Z}_2 \end{bmatrix} \quad ; \quad [T] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \quad (43)$$

$$[\bar{Z}_{abc}^{Th}] = [T] \times [\bar{Z}_{012}^{Th}] \times [T]^{-1} = \begin{bmatrix} R_{aa} + jX_{aa} & R_{ab} + jX_{ab} & R_{ac} + jX_{ac} \\ R_{ba} + jX_{ba} & R_{bb} + jX_{bb} & R_{bc} + jX_{bc} \\ R_{ca} + jX_{ca} & R_{cb} + jX_{cb} & R_{cc} + jX_{cc} \end{bmatrix} \quad (44)$$

Onde:

$R_{mm}, X_{nn}, R_{mn}, X_{mn}$: são as resistências e reatâncias, próprias e mútuas, por fase ($m = a, b, c; n = a, b, c$), respectivamente.

Observa-se que essa abordagem é suficiente para o algoritmo de localização de faltas e, embora os equivalentes de Thévenin sejam dinâmicos, essa informação pode ser obtida junto ao ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico).

4.1.3 Modelo de curto-circuito em linhas de transmissão

Normalmente os curtos-circuitos têm natureza resistiva fato pela qual é considerado neste trabalho que a falta é puramente resistiva. Portanto, é possível modelar os diferentes tipos de curto-circuito por meio de resistências posicionadas de forma conveniente, respeitando o tipo de curto-circuito, considerando as fases envolvidas e o ponto de ocorrência da falta.

O curto-circuito pode ser matematicamente representado por uma equação matricial, que relaciona tensões de fase no ponto de falta e as correntes de falta sendo apresentado pela equação 45.

$$[\dot{I}_{abc}^F] = [\bar{Y}_{abc}^{falta}] \times [\dot{V}_{abc}^F] \quad (45)$$

Onde:

$[\dot{I}_{abc}^F]$: matriz de correntes de fase no ponto de falta.

$[\bar{Y}_{abc}^{falta}]$: matriz de admitâncias da falta.

$[\dot{V}_{abc}^F]$: matriz de tensões de fase no ponto de falta.

□ Curto-circuito fase-terra (Monofásico)

Este tipo de Curto-circuito é modelado por uma resistência de falta conectada entre a fase em falta e a terra. O caso de um curto-circuito na fase A é mostrado na figura 28.

Figura 28: Curto-circuito monofásico, fase-terra (AN).

Fonte: (MANASSERO, 2006)

Para o curto-circuito fase-terra (AN), mostrado na figura 28, a matriz de admitâncias da falta é dada por:

$$[\bar{Y}_{an}^{falta}] = \begin{bmatrix} \frac{1}{R_{Fa}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (46)$$

□ Curto-circuito dupla-fase (Bifásico)

Este tipo de Curto-circuito é modelado por uma resistência de falta conectada entre as fases em falta. O caso de um curto-circuito na fase B e C é mostrado conforme a figura 29.

Figura 29: Curto-circuito bifásico, dupla-fase (BC).

Fonte: (MANASSERO, 2006)

Para o curto-circuito bifásico (BC) mostrado na figura 29, a matriz de admitâncias da falta é dada por:

$$[\bar{Y}_{bc}^{falta}] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{R_{Fbc}} & \frac{1}{R_{Fbc}} \\ 0 & \frac{1}{R_{Fbc}} & \frac{1}{R_{Fbc}} \end{bmatrix} \quad (47)$$

□ Curto-circuito dupla-fase-terra (Bifásico-terra)

Este tipo de Curto-circuito é modelado por uma resistência de falta conectada entre as fases em falta e duas resistências de falta, conectadas entre as fases em falta e a terra. O caso de um curto-circuito na fase B e C a terra é mostrado conforme a figura 30.

Figura 30: Curto-circuito bifásico-terra, dupla-fase-terra (BCN).

Fonte: (MANASSERO, 2006)

Para o curto-circuito dupla-fase-terra (BCN) mostrado pela figura 30, a matriz de admitâncias da falta é dada por:

$$[\overline{Y}_{bcn}^{falta}] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{R_{Fb} + R_{Fbc}} & -\frac{1}{R_{Fbc}} \\ 0 & -\frac{1}{R_{Fbc}} & \frac{1}{R_{Fbc} + R_{Fc}} \end{bmatrix} \quad (48)$$

□ Curto-circuito trifásico

Este tipo de Curto-circuito é modelada por três resistências de falta conectadas entre as fases em falta e duas resistências de falta, conectadas entre as fases em falta e a terra. O caso de um curto-circuito na fase A, B e C é mostrado conforme a figura 31.

Figura 31: Curto-circuito trifásico (ABC).

Fonte: (MANASSERO, 2006)

Para o curto-circuito trifásico (ABC), a matriz de admitâncias da falta é dada por:

$$[\bar{Y}_{abc}^{falta}] = \begin{bmatrix} \frac{1}{R_{Fa}} + \frac{1}{R_{Fab}} + \frac{1}{R_{Fca}} & -\frac{1}{R_{Fab}} & -\frac{1}{R_{Fca}} \\ -\frac{1}{R_{Fab}} & \frac{1}{R_{Fab}} + \frac{1}{R_{Fbc}} & -\frac{1}{R_{Fbc}} \\ -\frac{1}{R_{Fca}} & -\frac{1}{R_{Fbc}} & \frac{1}{R_{Fc}} + \frac{1}{R_{Fca}} + \frac{1}{R_{Fbc}} \end{bmatrix} \quad (49)$$

O procedimento para a determinação da matriz de admitâncias da falta em curtos-circuitos fase-terra, dupla fase e dupla fase-terra, onde as outras fases estão envolvidas o procedimento é o mesmo.

4.2 Processamento dos sinais de entrada

Os algoritmos de localização de faltas em linhas de transmissão apresentam rotinas de pré-processamento dos dados de entrada, a partir da obtenção de oscilografias apresentadas pelos RDP ou IED instalados nos terminais da linha. Este processamento é de fundamental importância pois os registros não estão representados de forma adequada. A sequência realizada para o processamento desses dados é ilustrada pela figura 32.

Figura 32: Estrutura do processamento dos dados de entrada.

Fonte: Autor.

Conforme a figura 32, os dados de entradas são as medições de tensões e correntes do sistema primário efetuadas pelos TC e TP, que reduzem a intensidade das grandezas aos níveis adequados dos circuitos internos dos registradores digitais. Uma vez obtidas as medições de tensões e correntes, necessita-se de uma interface eletrônica para realizar a conversão analógico-digital. Após a conversão, os dados são enviados ao computador da sala de controle onde serão processados pelo algoritmo de localização de faltas, e passarão por uma filtragem digital com o objetivo de extrair a componente fundamental dos sinais de tensão e corrente, identificar o tipo de falta e as fases envolvidas.

A extração da componente fundamental dos sinais de tensão e corrente, aplicada neste trabalho, será baseada no método da TDF. Os métodos para identificação do tipo de falta e das fases envolvidas não são discutidos neste trabalho.

4.2.1 Extração da componente fundamental dos sinais de tensão e corrente

O estimador fasorial para aplicação em localização de faltas em linhas de transmissão deve incluir o fato de que as ondas de corrente e tensão pós-falta podem apresentar algum conteúdo harmônico mesmo após a filtragem analógica, fatores que podem influenciar no erro de localização da falta. Por isso, a TDF é o método matemático normalmente utilizado para extração dos fasores de tensão e corrente, utilizando coeficientes seno e cosseno para desenvolver as componentes, real e imaginária, dos sinais.

Este método é amplamente utilizado devido a sua simplicidade e precisão na obtenção dos fasores na frequência fundamental quando os sinais se apresentam periódicos e contêm componentes de frequência harmônicas inteiras e até nível de componente contínua constante. A seguir são apresentadas as equações do método da TDF, utilizado neste trabalho para obter as componentes fundamentais das tensões e correntes, como indicado pelas seguintes equações conforme apresentado em (GU; YU, 2000):

$$\Re\{\dot{S}_n\} = \frac{2}{N} \sum_{n=1}^N \cos\left(\frac{2\pi \cdot n}{N}\right) \cdot s_n \quad (50)$$

$$\Im\{\dot{S}_n\} = \frac{2}{N} \sum_{n=1}^N \sin\left(\frac{2\pi \cdot n}{N}\right) \cdot s_n \quad (51)$$

Onde:

N : é o número de amostras por ciclo.

$n = 1, 2, 3, \dots N$.

s_n : representa a n -ésima amostra do sinal s dentro da janela de observação.

$\dot{S}_n$: é o n -ésimo fasor correspondente à amostra n do sinal s .

O cálculo da amplitude e da fase da componente fundamental, da forma de onda de tensão ou corrente $(v, i)_t$, é apresentado pelas seguintes equações:

$$|\dot{S}_n| = \sqrt{\Re\{\dot{S}_n\}^2 + \Im\{\dot{S}_n\}^2} \quad (52)$$

$$\theta_{\dot{S}_n} = \tan^{-1} \left(\frac{\Im\{\dot{S}_n\}}{\Re\{\dot{S}_n\}} \right) \quad (53)$$

A implementação computacional deste método para a extração das componentes fundamentais das tensões e correntes, para as linhas de transmissão com circuito simples e circuito duplo, foi feita por meio do software científico MATLAB.

4.2.2 Identificação do tipo de falta

Como terceiro passo é realizada a identificação do tipo de falta (curto-circuito monofásico, dupla-fase, dupla-fase-terra e trifásico), e das fases envolvidas na falta (AN, BN, CN, AB, BC, CA, ABN, BCN, CAN e ABC). O algoritmo para identificação dos tipos de falta e das fases envolvidas não faz parte do escopo deste trabalho.

4.3 Algoritmo proposto para localização de faltas em linhas de transmissão

Ao contrario dos métodos clássicos apresentados por (TAKAGI et al., 1982b; KUMAR; KUMAR, 2014; LIMA et al., 2013) e outros autores que procuram a localização da falta fundamentando-se na impedância, mas preservando o conceito da utilização de dados de apenas um terminal da linha de transmissão, a metodologia usada neste trabalho é baseada em um algoritmo que utiliza as componentes de fase das tensões e correntes de pré e pós-falta, ao invés de utilizar as componentes de sequência desses mesmos sinais.

De modo a iniciar o desenvolvimento do algoritmo proposto, apresenta-se inicialmente na figura 33 um diagrama unifilar representando um sistema elétrico em condições normais de operação, ou seja, condições de pré-falta composto pela linha de transmissão de comprimento ℓ com terminais local e remoto denominados L e R, respectivamente. E das fontes equivalentes de Thévenin com suas respectivas impedâncias nas extremidades da linha de transmissão.

Figura 33: Circuito pré-falta do sistema de transmissão.

Fonte: Autor.

A seguir, é mostrada pela figura 34, a representação da linha de transmissão por quadripolos de transmissão para o sistema elétrico em pré-falta.

Figura 34: Representação do circuito pré-falta com quadripolos de transmissão, modelo π -corrigido.

Fonte: Autor.

As figuras 33 e 34 ilustram uma linha de transmissão típica em condições normais de operação, com medições de tensões e correntes em apenas um terminal, neste caso no terminal local da linha. Os fasores de tensão e corrente de pré-falta no terminal remoto, e as fontes de tensão de Thévenin equivalente de pré-falta conectadas nos terminais da linha, podem ser determinados usando as relações matemáticas apresentadas nas equações 54 e 55 respectivamente:

$$\begin{bmatrix} [\dot{V}_{abc}^R]_{pré} \\ [\dot{I}_{abc}^R]_{pré} \end{bmatrix} = [T_{(\ell)}]^{-1} \times \begin{bmatrix} [\dot{V}_{abc}^L]_{pré} \\ [\dot{I}_{abc}^L]_{pré} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [A_{(\ell)}] & -[B_{(\ell)}] \\ -[C_{(\ell)}] & [D_{(\ell)}] \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} [\dot{V}_{abc}^L]_{pré} \\ [\dot{I}_{abc}^L]_{pré} \end{bmatrix} \quad (54)$$

$$\begin{cases} [\dot{V}_{abc}^{Th-L}]_{pré} = [\dot{V}_{abc}^L]_{pré} + [\bar{Z}_{abc}^{Th-L}] \times [\dot{I}_{abc}^L]_{pré} \\ [\dot{V}_{abc}^{Th-R}]_{pré} = [\dot{V}_{abc}^R]_{pré} - [\bar{Z}_{abc}^{Th-R}] \times [\dot{I}_{abc}^R]_{pré} \end{cases} \quad (55)$$

Ante a ocorrência de uma falta na linha de transmissão do sistema elétrico ilustrado na figura 33, independentemente do tipo de falta conforme já descritas e apresentadas na seção 4.1.3 deste capítulo, encontraremos alterações nas medições dos fasores das tensões e correntes, devido ao fato de ter acontecido uma falta a uma distancia “ x ” a partir do terminal local da linha de transmissão.

A seguir é ilustrado o mesmo sistema de transmissão da figura 33, mas desta vez com a presença de uma falta no ponto F da linha de transmissão sendo ilustrada pela figura 35.

De acordo com a figura 35, é calculada a tensão de pós-falta do terminal remoto apresentado pela seguinte equação:

$$[\dot{V}_{abc}^R]_{pós} = [\dot{V}_{abc}^{Th-R}]_{pós} - [\bar{Z}_{abc}^{Th-R}] \times [\dot{I}_{abc}^R]_{pós} \quad (56)$$

Figura 35: Circuito pós-falta do sistema de transmissão.

Fonte: Autor.

As fontes de tensão de Thévenin equivalente de pós-falta ligadas a ambos os terminais da linha de transmissão são considerados iguais aos valores de pré-falta, visto que nos instantes iniciais de ocorrência da falta não varia como mostra a equação 57.

$$\begin{cases} [\dot{V}_{abc}^{Th-L}]_{pós} = [\dot{V}_{abc}^{Th-L}]_{pré} \\ [\dot{V}_{abc}^{Th-R}]_{pós} = [\dot{V}_{abc}^{Th-R}]_{pré} \end{cases} \quad (57)$$

A representação por quadripolos da linha de transmissão do sistema elétrico em pós-falta, ante a ocorrência de uma falta no ponto F da linha, é ilustrada pela figura 36. Sendo analisada em dois trechos, o primeiro trecho é L-F, onde o ponto da falta F encontra-se a uma distância x do terminal local, e o segundo trecho é F-R, onde o ponto da falta F encontra-se a uma distância $(l - x)$ do terminal remoto.

 Figura 36: Representação do circuito pós-falta com quadripolos, modelo π -corrigido.

Fonte: Autor.

A seguir é apresentada a relação matemática de cada trecho utilizando a representação da linha por quadripolos de transmissão:

Trecho L-F

$$\begin{bmatrix} \left[\dot{V}_{abc}^{LF} \right]_{pós} \\ \left[\dot{I}_{abc}^{LF} \right]_{pós} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left[A_{(x)} \right] & -\left[B_{(x)} \right] \\ -\left[C_{(x)} \right] & \left[D_{(x)} \right] \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \left[\dot{V}_{abc}^L \right]_{pós} \\ \left[\dot{I}_{abc}^L \right]_{pós} \end{bmatrix} \quad (58)$$

A partir da equação 58 que representa o equacionamento do quadripolo de transmissão do primeiro trecho L-F, são obtidas as tensões no ponto de falta F fornecidas pelo terminal local $\left[\dot{V}_{abc}^{LF} \right]_{pós}$, e as correntes no ponto de falta fornecidas pelo terminal local da linha $\left[\dot{I}_{abc}^{LF} \right]_{pós}$.

Trecho F-R

$$\begin{bmatrix} \left[\dot{V}_{abc}^{FR} \right]_{pós} \\ \left[\dot{I}_{abc}^{FR} \right]_{pós} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left[A_{(\ell-x)} \right] & -\left[B_{(\ell-x)} \right] \\ -\left[C_{(\ell-x)} \right] & \left[D_{(\ell-x)} \right] \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \left[\dot{V}_{abc}^R \right]_{pós} \\ \left[\dot{I}_{abc}^R \right]_{pós} \end{bmatrix} \quad (59)$$

A partir da equação 59 que representa o equacionamento do quadripolo de transmissão do segundo trecho F-R da linha de transmissão em falta, são obtidas as tensões no ponto de falta F fornecidas pelo terminal remoto $\left[\dot{V}_{abc}^{FR} \right]_{pós}$, e as correntes no ponto de falta fornecidas pelo terminal remoto da linha $\left[\dot{I}_{abc}^{FR} \right]_{pós}$.

A figura 37 ilustra as tensões no ponto de falta, em função das correntes injetadas na falta, a partir do terminal local $\left[\dot{I}_{abc}^{LF} \right]$ e do terminal remoto $\left[\dot{I}_{abc}^{FR} \right]$.

Figura 37: Correntes que circulam no ponto de falta F.

Fonte: Autor.

Conforme ilustra a figura 37, a soma das correntes de falta fornecidas por cada terminal da linha é igual a corrente de falta no nó F, tem-se:

$$\left[\dot{I}_{abc}^F \right] = \left[\dot{I}_{abc}^{LF} \right] + \left[\dot{I}_{abc}^{FR} \right] = \left[\bar{Y}_{abc}^F \right] \times \left[\dot{V}_{abc}^F \right] \quad (60)$$

Sendo: $\left[\dot{V}_{abc}^F \right] = \left[\dot{V}_{abc}^{LF} \right]_{pós} = \left[\dot{V}_{abc}^{FR} \right]_{pós}$, são substituídas as equações 56, 58 e 59 na equação 60 e isolando as tensões no ponto de falta, obtém-se as tensões no ponto de falta

fornechas pelo terminal remoto $[\dot{V}_{abc}^{FR}]_{pós}$, conforme mostra a equação 61:

$$[\dot{V}_{abc}^{FR}] = \left\{ [\bar{Y}_{abc}^F] + [D_{(x)}]^{-1} \times [C_{(x)}] + [D_{(\ell-x)}]^{-1} \times [C_{(\ell-x)}] \right\}^{-1} \times \left\{ [D_{(x)}]^{-1} \times \right. \\ \left. \times [\dot{I}_{abc}^L]_{pós} + [D_{(\ell-x)}]^{-1} \times \left([\dot{I}_{abc}^{Th-R}]_{pós} - [\bar{Y}_R^{Th}] \times [\dot{V}_{abc}]_{pós} \right) \right\} \quad (61)$$

Na equação 61 observa-se que a tensão no ponto de falta F, fornecida pelo terminal remoto, é dependente das admitâncias de falta $[\dot{Y}_{abc}^F]$, da distância de falta “x” e da tensão de pós-falta do terminal remoto $[\dot{V}_{abc}^R]$. O cálculo dessa tensão remota é feita a partir da montagem da matriz de admitâncias nodais do sistema, conforme mostra-se na seguinte seção.

4.3.1 Montagem da matriz de admitâncias do sistema elétrico

A montagem da matriz de admitâncias nodais do sistema é realizada com base na análise nodal do circuito do sistema de transmissão conforme (GRAINGER; STEVENSON, 1994). Essa montagem é conduzida de forma a garantir a inclusão da influência das mútuas nos sistemas de transmissão com circuito simples e duplo. A seguir apresenta-se a montagem da matriz de admitâncias para sistemas com circuito simples, para o sistema com circuito duplo a montagem dessa matriz é detalhada no Anexo B deste trabalho.

Figura 38: Montagem da matriz de admitâncias para sistemas com circuito simples.

Fonte: Autor.

Na figura 38 apresenta-se o sistema de transmissão com circuito simples que inclui a matriz de admitâncias da falta, as correntes injetadas, as admitâncias de Thévenin nos terminais e as matrizes de admitâncias da linha de transmissão. As equações da análise nodal do sistema são:

$$[\tilde{E}] = [\bar{Y}_{Sistema}]^{-1} \times [\tilde{b}] \quad (62)$$

Onde:

$$\begin{bmatrix} \bar{Y}_{Sistema} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [R] & -[\bar{Y}_2] & [0] \\ -[\bar{Y}_2] & [S] & -[\bar{Y}_5] \\ [0] & -[\bar{Y}_5] & [H] \end{bmatrix} \quad (63)$$

Sendo:

$$\begin{cases} [R] = [\bar{Y}_L^{Th}] + [\bar{Y}_1] + [\bar{Y}_2] \\ [S] = [\bar{Y}_2] + [\bar{Y}_3] + [\bar{Y}_{abc}^F] + [\bar{Y}_4] + [\bar{Y}_5] \\ [H] = [\bar{Y}_R^{Th}] + [\bar{Y}_5] + [\bar{Y}_6] \end{cases}$$

Sabendo que:

$$\begin{bmatrix} \dot{\tilde{E}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [\dot{V}_{abc}^L]_{pós} \\ [\dot{V}_{abc}^F]_{pós} \\ [\dot{V}_{abc}^R]_{pós} \end{bmatrix} \quad (64)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\tilde{b}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [\dot{I}_{abc}^{Th-L}]_{pós} \\ [0] \\ [\dot{I}_{abc}^{Th-R}]_{pós} \end{bmatrix} \quad (65)$$

Além de:

$$\begin{cases} [\dot{I}_{abc}^{Th-L}]_{pós} = [\bar{Y}_L^{Th}] \times [\dot{V}_{abc}^{Th-L}]_{pós} \\ [\dot{I}_{abc}^{Th-R}]_{pós} = [\bar{Y}_R^{Th}] \times [\dot{V}_{abc}^{Th-R}]_{pós} \end{cases} \quad (66)$$

Dado que o sistema é trifásico, as matrizes de admitância que compõem a matriz de admitâncias nodais possuem dimensão $[3 \times 3]$. Além disso, as tensões nodais e as correntes injetadas possuem dimensão $[3 \times 3]$. Sendo assim:

$[\bar{Y}_{sistema}]$: matriz de admitâncias do sistema de transmissão, dimensão $[9 \times 9]$.

$[\tilde{E}]$: matriz de tensões nos nós L, F e R, dimensão $[9 \times 1]$.

$[\tilde{b}]$: matriz de injeção de correntes de Thévenin, dimensão $[9 \times 1]$.

Finalmente a partir da equação 64, é possível obter a tensão de pós-falta no terminal remoto, e na sequência é substituída na equação 61 a fim de obter a tensão no ponto de falta fornecida pelo terminal remoto $[\dot{V}_{abc}^{FR}]$, conforme é mostrado pela equação 67.

$$\begin{aligned}
 [\dot{V}_{abc}^{FR}] = & \left\{ [\bar{Y}_{abc}^F] + [D_{(x)}]^{-1} \times [C_{(x)}] + [D_{(\ell-x)}]^{-1} \times [C_{(\ell-x)}]^{-1} \right\} \left\{ [D_{(x)}]^{-1} \times \right. \\
 & \left. \times [\dot{I}_{abc}^L]_{pós} + [D_{(\ell-x)}]^{-1} \times \left([\dot{I}_{abc}^{Th-R}]_{pós} - [\bar{Y}_R^{Th}] \times [\dot{E}_{\sim(remoto)}] \right) \right\}
 \end{aligned} \tag{67}$$

Dessa maneira, já é possível definir a função objetivo a ser otimizada, conforme é detalhado na seguinte seção.

4.4 Função objetivo para a otimização da localização de faltas

Nesta etapa é apresentado o equacionamento matemático que definirá a função objetivo a ser otimizada, sendo esta apresentada de duas maneiras diferentes a fim de avaliar a precisão e o desempenho do algoritmo proposto neste trabalho.

A primeira maneira de definir a função objetivo é em relação à diferença de tensão no ponto de falta, procedimento denominado “otimização 1”. Ao analisar o sistema de transmissão se percebe hipoteticamente que os valores das tensões de pós-falta no ponto da falta F fornecidas tanto pelo terminal local quanto pelo terminal remoto devem ser as mesmas, portanto subtraindo um a partir da outra deveria resultar zero.

A segunda maneira de definir a função objetivo é em relação à soma entre a diferença das tensões e a diferença de correntes, medidas e calculadas em por unidade no terminal local, procedimento denominado “otimização 2”. Tal soma entre as diferenças de tensões e correntes em por unidade calculadas e medidas no terminal local da linha deveria resultar zero. Seja qual for a maneira de ser apresentada a função objetivo, estas dependeram unicamente de duas variáveis desconhecidas que são a matriz de admitâncias da falta $[\bar{Y}_{abc}^F]$ e a distância de falta x . A seguir é apresentada a função objetivo para ambos os modos de otimização.

□ Otimização 1

A primeira função objetivo denominada “otimização 1”, esta relacionada pela diferença de tensões no ponto de falta F, esta diferença é dado entre a tensão fornecida pelo terminal local e a tensão fornecida pelo terminal remoto, calculadas e apre-

sentadas pelas equações 58 e 67, respectivamente. A função objetivo denominada “otimização 1” mostra-se na equação 68.

$$F(\bar{Y}_{abc}^F, x) = |\Delta \dot{V}_{abc}^F| = |\dot{V}_{abc}^{FR} - \dot{V}_{abc}^{FL}| = 0 \quad (68)$$

Substituindo as equações 58 e 67 na equação 68, obtém-se:

$$\begin{aligned} |\Delta \dot{V}_{abc}^F| = & \left| \left\{ [\bar{Y}_{abc}^F] + [D_{(x)}]^{-1} \times [C_{(x)}] + [D_{(\ell-x)}]^{-1} \times [C_{(\ell-x)}] \right\}^{-1} \times \right. \\ & \times \left\{ [D_{(x)}]^{-1} \times [\dot{I}_{abc}^L]_{pós} + [D_{(\ell-x)}]^{-1} \times \left([\dot{I}_{abc}^{Th-R}]_{pós} - \right. \right. \\ & \left. \left. - [\bar{Y}_R^{Th}] \times [\dot{E}_{\sim(remoto)}] \right) \right\} - \left\{ [A_{(x)}] \times [\dot{V}_{abc}^L]_{pós} - \right. \\ & \left. \left. - [B_{(x)}] \times [\dot{I}_{abc}^L]_{pós} \right\} \right| \end{aligned} \quad (69)$$

O equacionamento que representa a função objetivo para a otimização no ponto de falta é dado pela equação 69. Esta equação é válida para sistemas com circuito duplo e simples, se diferenciando uma da outra apenas no dimensionamento das matrizes de admitâncias e das matrizes de tensões e correntes.

□ Otimização 2

A segunda função objetivo denominada “otimização 2”, é dada pela diferença entre valores medidos e calculados das tensões e das correntes em valores por unidade do terminal local da linha. Esta função objetivo também é baseada na análise do sistema de transmissão e na montagem das matrizes de admitâncias nodais do sistema. Para definir esta função objetivo é necessário calcular as tensões e correntes no terminal local, sendo obtidas a partir das equações 64 e 58, respectivamente. Conforme são apresentados pela seguinte equação.

$$\begin{cases} [\dot{V}_{abc}^L]_{pós}^{calc.} = [\dot{E}_{\sim(local)}] \\ [\dot{I}_{abc}^L]_{pós}^{calc.} = [B_{(x)}]^{-1} \times \left\{ [A_{(x)}] \times [\dot{V}_{abc}^L]_{pós} - [\dot{E}_{\sim(falta)}] \right\} \end{cases} \quad (70)$$

Uma vez obtidos os valores calculados das tensões e correntes no terminal local, e conjuntamente com os valores medidos dos mesmos é possível definir a função objetivo denominada “otimização 2”, conforme mostra-se na equação 71.

$$F(\bar{Y}_{abc}^F, x) = |\Delta \dot{V}_{abc}^L + \Delta \dot{I}_{abc}^L|_{(p.u)} = 0 \quad (71)$$

Onde:

$$\left| \Delta \dot{V}_{abc}^L \right|_{(p.u)} = \frac{\left| \dot{V}_{calc.}^{L(a)} - \dot{V}_{med.}^{L(a)} \right|}{\left| \dot{V}_{med.}^{máx} \right|} + \frac{\left| \dot{V}_{calc.}^{L(b)} - \dot{V}_{med.}^{L(b)} \right|}{\left| \dot{V}_{med.}^{máx} \right|} + \frac{\left| \dot{V}_{calc.}^{L(c)} - \dot{V}_{med.}^{L(c)} \right|}{\left| \dot{V}_{med.}^{máx} \right|} \quad (72)$$

$$\left| \Delta \dot{I}_{abc}^L \right|_{(p.u)} = \frac{\left| \dot{I}_{calc.}^{L(a)} - \dot{I}_{med.}^{L(a)} \right|}{\left| \dot{I}_{med.}^{máx} \right|} + \frac{\left| \dot{I}_{calc.}^{L(b)} - \dot{I}_{med.}^{L(b)} \right|}{\left| \dot{I}_{med.}^{máx} \right|} + \frac{\left| \dot{I}_{calc.}^{L(c)} - \dot{I}_{med.}^{L(c)} \right|}{\left| \dot{I}_{med.}^{máx} \right|} \quad (73)$$

Sendo:

$$\left| \dot{V}_{med.}^{máx} \right| = \text{máximo} \left(\left[\left| \dot{V}_{med.}^{L(a)} \right|, \left| \dot{V}_{med.}^{L(b)} \right|, \left| \dot{V}_{med.}^{L(c)} \right| \right] \right)$$

$$\left| \dot{I}_{med.}^{máx} \right| = \text{máximo} \left(\left[\left| \dot{I}_{med.}^{L(a)} \right|, \left| \dot{I}_{med.}^{L(b)} \right|, \left| \dot{I}_{med.}^{L(c)} \right| \right] \right)$$

É a partir das equações 68 e 71 que se procura a localização da falta em uma linha de transmissão, tanto para a “otimização 1” quanto para a “otimização 2”, respectivamente. Tendo unicamente como variáveis desconhecidas a matriz de admitâncias da falta $\left[\bar{Y}_{abc}^F \right]$ e a distância de falta x . Devido ao modelo empregado para a representação da linha de transmissão, não é possível determinar uma solução analítica para a função objetivo. Por essa razão, decidiu-se implementar um algoritmo baseado nos métodos heurísticos para providenciar uma solução numérica a essas equações, as ferramentas de otimização utilizadas neste trabalho são os AG e o PS.

Vale ressaltar que, devido às naturezas heurísticas de ambos os métodos de otimização, pode-se dizer que são menos propícios a ficarem presos em mínimos locais, implicando uma maior eficiência e precisão na determinação do local de ocorrência da falta. A versão destes algoritmos implementados foi descrita e implementada por meio do software científico MATLAB.

4.5 Configurações das ferramentas de otimização

Nesta seção são apresentadas as diferentes configurações dos métodos heurísticos utilizados neste trabalho. Como já apresentado na seção 4.4, a função objetivo possui unicamente como variáveis desconhecidas a matriz de admitâncias da falta $\left[\bar{Y}_{abc}^F \right]$ e a distância de falta x tanto para a “otimização 1” quanto para a “otimização 2”, e para iniciar as configurações das ferramentas de otimização utilizadas é preciso definir os limites superior e inferior dessas variáveis.

Antes de definir esses limites é necessário detalhar que a variável da matriz de admitâncias da falta $\left[\bar{Y}_{abc}^F \right]$ é dependente de duas resistências, devido ao modelamento da matriz de admitâncias da falta que é constituída por uma resistência entre fases R_f e uma resistência de aterramento R_n .

Os limites superior e inferior, Under Bound (UB) e Louder Bound (LB), das variáveis são os mesmos, tanto para a função de otimização baseada nos AG quanto para o algoritmo baseado em PS. Os valores dessas variáveis devem estar relacionados com os eventos reais dos sistemas elétricos. A seguir são mostrados os limites dessas variáveis.

$$\text{Variaveis} = [x, R_f, R_n]$$

$$\text{Limite Superior}_{(UB)} = [(\ell) \text{ km}, 1000\Omega, 1000\Omega]$$

$$\text{Limite Inferior}_{(LB)} = [(0) \text{ km}, 10^{-4}\Omega, 10^{-4}\Omega]$$

Onde:

x é a distância de falta em $[km]$.

R_f é a resistência de falta entre fases em $[\Omega]$.

R_n é a resistência de aterramento em $[\Omega]$.

ℓ é o comprimento da linha de transmissão em $[km]$.

4.5.1 Parametrização do algoritmo genético

Os dados obtidos por meio das simulações realizadas dos diferentes sistemas de transmissão são tomados como dados de entrada para o algoritmo de otimização, este algoritmo de otimização deve buscar a distância de falta e as resistências de falta que compõem a matriz de admitâncias da falta, na qual através de vários testes realizados e a observação do bom desempenho do AG definiu-se a sua parametrização conforme mostra a tabela 6.

Tabela 6: Configurações do algoritmo genético

	Sintaxe	Valor	Descrição
Inicialização das variáveis	d_F	$\text{Comprimento}/2$ $[km]$	Chute inicial da distância de falta.
	R_f	1 Ω	Chute inicial da resistência de falta-fase.
	R_n	1 Ω	Chute inicial da resistência de aterramento.
População inicial	‘PopulationSize’	300 <i>indivíduos</i>	Tamanho da população.
	‘PopulationType’	‘DoubleVetor’	Codificação real da população.

... Continua na página seguinte

Tabela 6 - continuação

		ℓ	Geração randômica da população inicial entre (LB e UB).
	‘InitialPopulation’	R_f R_n	
Função aptidão	‘Vetorize’	‘on’	O cálculo da função aptidão será vetorizado.
	‘FitnessScalingFcn’	@fitscalingrank	Avaliação da população inicial pelo método Rank.
Função de seleção e reprodução	‘EliteCount’	30%	Número de indivíduos da geração atual que passam para a seguinte geração.
	‘CrossoverFraction’	80%	Percentual de indivíduos que se reproduziram.
	‘SelectionFcn’	@selectionstochunif	Seleção dos indivíduos para reprodução pelo método uniforme estocástico.
Operadores genéticos	‘CrossoverFcn’	@crossoverheuristic	Cruzamento heurístico, com distância de passo entre o descendente e o progenitor com melhor aptidão.
	‘MutationFcn’	@mutationadapt-feasible 0,04	É aplicada a mutação adaptativa viável, indicando o valor de direção de passo.
Crítérios de parada	‘FitnessLimit’	10^{-5}	Limite para convergência da solução.
	‘Generations’	500 _{gerações}	Número máximo de gerações para encerrar o processo de iterações.

... Continua na página seguinte

Tabela 6 - continuação

‘StallGenLimit’	250 _{gerações}	Número de gerações sem modificações.
‘TolFun’	10 ⁻⁵	Tolerância para convergência da solução.

Fonte: Autor.

4.5.2 Parametrização do *Pattern Search*

A outra ferramenta de otimização a ser configurada é a parametrização do PS, que também realizará a busca da distância de falta e das resistências de falta apresentando uma configuração diferente quando comparada com os AG, mas preservando o baseamento e a aplicação dos métodos heurísticos. Na procura de obter o bom desempenho do algoritmo de otimização também foi realizado vários testes para encontrar uma configuração adequada e de fácil adaptação com a função objetivo para dar solução ótima ao problema, a seguir a tabela 7 mostra a respectiva parametrização.

Tabela 7: Configurações do *Pattern Search*

	Sintaxe	Valor	Descrição
Inicialização das variáveis	d_F	<i>Comprimento</i> /2 [km]	Chute inicial da distância de falta.
	R_f	500Ω	Chute inicial da resistência de falta-fase.
	R_n	500Ω	Chute inicial da resistência de aterramento.
Opção de busca	‘SearchMethod’	‘GPSPositiveBasis2N’	Especifica o método de busca utilizado.
	‘CompleteSearch’	‘on’	Avalia todos os pontos em um passo de busca.
Opções da Malha	‘InitialMeshSize’	1.5	Especifica o tamanho da malha inicial.

... Continua na página seguinte

Tabela 7 - continuação

	‘MeshAccelerator’	‘on’	Indica se o fator de contração é multiplicado por 0.5, após cada iteração bem-sucedida.
Método de votação	‘PollMethod’	‘GPSPositive’	A estratégia utilizada é com base máxima duas vezes o número de variáveis e com direção fixa.
	‘CompletePoll’	‘on’	Especifica se todos os pontos da malha atual devem ter votação em cada iteração.
Critérios de parada	‘MaxIter’	1000	Indica o número máximo de iterações que realiza o algoritmo do PS.
	‘MaxFunEvals’	100000	Especifica o número máximo de avaliações da função objetivo.
	‘TimeLimit’	100 _{segundos}	Tempo máximo em segundos para encerrar o processo do PS.
	‘TolBind’	10^{-10}	Especifica a tolerância mínima da distância entre o ponto atual e o limite da região viável de busca.
	‘TolFun’	10^{-10}	Indica a tolerância mínima para a convergência da função objetivo.

Fonte: Autor.

Sistemas simulados e análise dos resultados

Neste capítulo são apresentados os sistemas de transmissão simulados, e a análise dos resultados obtidos da localização de faltas nas diferentes linhas de transmissão simuladas, sendo apresentadas nas seções 5.1 e 5.2, respectivamente.

5.1 Sistemas simulados (Software ATP/EMTP)

Foram simulados quatro sistemas de transmissão diferentes, nos níveis de tensão de 138, 230, 500 e 765 [kV], usando o software ATP/EMTP, que permite a simulação de transitórios eletromagnéticos em redes polifásicas. Esses sistemas representam sistemas reais de transmissão brasileiros, as características de cada uma delas podem ser encontradas na referência de (SANTOS, 2004), sendo fornecidas pela Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS).

5.1.1 Sistemas de transmissão simulados na interface do ATP-Draw

Atraves da interface do ATPDraw foram montados os sistemas de transmissão a serem simulados, sendo constituídos por uma linha de transmissão de dois terminais (dividida em cinco trechos de igual comprimento para aplicação dos curtos-circuitos, cada trecho dividido foi modelado utilizando a componente Line Constants (LCC) do ATPDraw), equivalentes de Thévenin local e remoto (fonte + impedância), medidores de tensão e corrente nos terminais da linha, e circuito de chaves para o modelo de curto-circuito a ser aplicado. No anexo D apresenta-se os arquivos de entrada do ATP/EMTP, mostrando detalhadamente os parâmetros de cada componente do sistema. A seguir, são apresentados os diferentes sistemas de transmissão simulados na interface ATPDraw.

❑ Sistema de transmissão de 138 [kV] - Circuito duplo

Este sistema de transmissão possui uma linha de transmissão de circuito duplo, de comprimento igual a 74 km, e os curtos-circuitos foram aplicados no circuito 1 da linha de transmissão, conforme ilustra a figura 39.

Figura 39: Sistema de transmissão de 138 [kV] - Circuito duplo na interface ATPDraw.

Fonte: Autor.

❑ Sistemas de transmissão de 230, 500 e 765 [kV] - Circuito simples

Todos esses sistemas de transmissão possuem linhas de transmissão de circuito simples, cujos comprimentos são 80, 181 e 265 km, respectivamente. A interface desses três sistemas de transmissão são similares e ilustrada pela figura 40.

Figura 40: Sistema de transmissão de 230, 500 e 765 [kV] - Circuito simples na interface ATPDraw.

Fonte: Autor.

A seguir, são apresentadas as características de cada sistema de transmissão. Isto é, as potências de curto-circuito trifásica e monofásica, carregamentos (fluxo de potência), nível de tensão e comprimento das linhas de transmissão, conforme a tabela 8.

Tabela 8: Características dos sistemas de transmissão simulados.

Nível de Tensão [kV]	Terminal Local		Terminal Remoto		Carregamento (Fluxo de Potência)	
	$S_{cc1\phi}$ [GVA]	$S_{cc3\phi}$ [GVA]	$S_{cc1\phi}$ [GVA]	$S_{cc3\phi}$ [GVA]	P [MW]	Q [MVar]
138	2,92 $\angle$ 87°	3,89 $\angle$ 86°	1,51 $\angle$ 78°	1,99 $\angle$ 74°	28	30
230	1,47 $\angle$ 83°	1,95 $\angle$ 81°	3,61 $\angle$ 87°	4,81 $\angle$ 86°	96	22
500	11,8 $\angle$ 87°	15,8 $\angle$ 86°	11,1 $\angle$ 88°	14,8 $\angle$ 87°	1250	40
765	15,1 $\angle$ 87°	20,1 $\angle$ 87°	16,7 $\angle$ 88°	22,3 $\angle$ 87°	2000	300

Fonte: (SANTOS, 2004).

A continuação são apresentadas as diferentes condições operativas das linhas de transmissão, de forma a gerar casos de simulação de faltas próximas das condições reais.

5.1.2 Condições operativas das linhas de transmissão

A partir das quatro linhas de transmissão apresentadas no Anexo C, diversos casos foram gerados, visando à representação dessas linhas em operação normal e situações de curto-circuito. Essas situações possuem diferentes características tais como: variação no instante de ocorrência da falta, variação no ponto de falta, variação do tipo e da resistência de falta, e variação no carregamento da linha tanto para carregamento baixo quanto para carregamento alto. Essas variações permitem constituir uma ampla gama de simulações da linha de transmissão, o que é de fundamental importância na fase de testes do algoritmo implementado.

□ Instante de ocorrência da falta

Os defeitos para a geração dos sinais de falta foram aplicados em dois instantes distintos tendo como unidade de medição o milissegundo (ms). Os dois valores dos instantes de falta são os seguintes (após 1 ciclo e $1\frac{1}{4}$ ciclos de simulação), ou seja, $t_f = 16,67$ e $20,8$ ms.

□ Ponto de falta ou distância do curto-circuito imposto a cada linha de transmissão

Os pontos de curto-circuito foram fixados com distâncias iguais a 20%, 40%, 60% e 80% do comprimento da linha de transmissão. De acordo com o sistema de transmissão simulado na interface do ATPDraw, os pontos de falta são os seguintes: 020L1, 030L1, 040L1 e 050L1, como já apresentados pelas figuras 39 e 40 da seção 5.1.1.

❑ Tipo de curto-circuito imposto a cada linha de transmissão

Os tipos de curto-circuito possíveis em linhas de transmissão foram considerados, sendo os seguintes: curto-circuito monofásico (AN), curto-circuito bifásico (BC), curto-circuito bifásico-terra (BCN), curto-circuito trifásico (ABC).

❑ Resistência de curto-circuito

Durante as simulações foram considerados diferentes valores de resistências de falta para os distintos curtos-circuitos apresentados durante a ocorrência de uma falta, a fim de simular casos mais próximos da realidade. Tendo como unidade de medição os ohms (Ω), estes valores de resistências de falta são de 0,01; 1; 2; 5; 20 e 50 Ω .

❑ Variação do carregamento sobre a linha de transmissão

Para a simulação dos sistemas de transmissão foram considerados dois tipos de carregamento: baixo e alto. Para carregamento baixo se considera corrente de linha cerca de 30% da corrente nominal e 80% para um carregamento alto. Tomando como referência essa relação, alteraram-se as potências ativas e reativas que fluem entre os sistemas elétricos interligados pelas linhas de transmissão, com o fim de realizar variações de modulo e fase da fonte equivalente de Thévenin remoto dos diferentes sistemas de transmissão simulados, mantendo o fator de potência adequado para o seu bom desempenho.

A seguir, a tabela 9 apresenta as diferentes condições de operação das linhas de transmissão simuladas, gerando um total de 928 situações de falta.

Tabela 9: Condições de operação dos sistemas de transmissão simulados.

Tipo de falta	R_F [Ω]	Instante [ms]	Distância de falta [%]	Total de casos				
AN	0,01; 1; 2; 5; 20 e 50	16,67 e 20,8	20%, 40%, 60% e 80% do comprimento da linha de transmissão.	288				
BC BCN	0,01; 1 e 2			384				
ABC	0,01; 1; 2 e 5			256				
Carregamentos (fonte remota)								
LT [kV]	Baixo				Alto			
	P [MW]	Q [MVar]	Mod. [kV]	Fase [°]	P [MW]	Q [MVar]	Mod. [kV]	Fase [°]
138	36	30	128	-2,8	84	30	125	-8,1
230	120	22	220	-10	280	22	229	-23
500	433	40	495	-8,9	822	40	508	-16
765	690	300	715	-10	1300	300	739	-18

Fonte: Autor.

5.1.3 Oscilografias de faltas simuladas

Depois de realizada as simulações de cada sistema de transmissão, são apresentadas as oscilografias por meio do programa de visualização PlotXY do ATP/EMTP. A seguir, são mostradas algumas oscilografias das simulações realizadas neste trabalho.

As oscilografias apresentadas na figura 41 representam os sinais de tensões e correntes medidos no terminal local do sistema de transmissão de 138 [kV] com circuito duplo, para uma falta fase-terra AN aplicada no circuito 1 ao 20% do comprimento da linha a partir do terminal local e no instante de falta igual a 16,67 milissegundos. Nesta figura é possível observar os sinais de pré-falta e pós-falta.

Figura 41: Oscilografias de tensões (a) e correntes (b) no terminal local, para uma falta fase-terra AN em uma linha de transmissão de 138 [kV].

(a) Tensões no terminal local - Falta AN

(b) Correntes no terminal local - Falta AN

Fonte: Autor.

A figura 42 apresenta oscilografias de tensões e correntes medidos no terminal local da linha de transmissão de 230 [kV] com circuito simples, para uma falta dupla-fase BC aplicada ao 60% do comprimento da linha a partir do terminal local no instante de falta de 20,8 milissegundos.

Figura 42: Oscilografias de tensões (a) e correntes (b) no terminal local, para uma falta dupla-fase BC em uma linha de transmissão de 230 [kV].

(a) Tensões no terminal local - Falta BC

(b) Correntes no terminal local - Falta BC

Fonte: Autor.

Para o sistema de transmissão de 500 [kV], as oscilografias de tensões e correntes medidas no terminal local para uma falta dupla-fase-terra BCN aplicada ao 20% do comprimento da linha a partir do terminal local no instante de falta 20,8 milissegundos são apresentadas pela figura 43.

Figura 43: Oscilografias de tensões (a) e correntes (b) no terminal local, para uma falta dupla-fase-terra BCN em uma linha de transmissão de 500 [kV].

(a) Tensões no terminal local - Falta BCN

(b) Correntes no terminal local - Falta BCN

Fonte: Autor.

Por ultimo é apresentada pela figura 44 as oscilografias de tensões e correntes obtidas da simulação do sistema de transmissão de 765 [kV], estas oscilografias foram obtidas através da aplicação de uma falta trifásica ABC ao 60% do comprimento da linha a partir do terminal local no instante de falta de 16,67 milissegundos.

Figura 44: Oscilografias de tensões (a) e correntes (b) no terminal local, para uma falta trifásica ABC em uma linha de transmissão de 765 [kV].

Fonte: Autor.

Todas as oscilografias geradas pelas simulações foram representadas por fasores dos sinais de tensões e correntes calculados pela TDF, como já explicado e ilustrado no processamento de dados visto na seção 4.2 do capítulo 4. A partir deste momento, todos os dados obtidos pelas simulações serão utilizados no processamento do algoritmo proposto, para realizar a procura da localização da falta, conforme detalhado pelo fluxograma do software de simulação apresentado na seguinte seção.

5.1.4 Fluxograma do software de simulação para testes do algoritmo proposto para a localização de faltas

Nesta seção é apresentado um fluxograma do software proposto e implementado para a localização de faltas, mostrando a automatização do processo iterativo e os passos de otimização. O algoritmo proposto para localização de faltas em linhas de transmissão utiliza dados de apenas um terminal e é baseado nos métodos heurísticos para a busca da distância da falta.

Figura 45: Fluxograma do software de simulação proposto para a localização de faltas.

Fonte: Autor.

5.2 Análise dos resultados

Esta seção apresenta a avaliação e análise dos resultados obtidos após a otimização das funções objetivos do algoritmo proposto para localização de faltas, que utilizando as ferramentas de otimização baseadas nos métodos heurísticos como os AG e o PS procurou-se a distância de ocorrência da falta. Conforme foi descrito no fluxograma ilustrado pela figura 45 da seção 5.1.4.

Foram obtidos resultados para as quatro linhas de transmissão simuladas, isto é, para as linhas de transmissão de 138, 230, 500 e 765 [kV]. Para a obtenção desses resultados, a configuração das ferramentas de otimização foi única para a otimização da função objetivo, tanto para a “otimização 1” (minimização no ponto da falta), quanto para a “otimização 2” (minimização no terminal local da falta), conforme já visto na seção 4.4. Portanto, a apresentação dos resultados para cada linha de transmissão será dividida em duas partes, em que a primeira parte apresentará os resultados obtidos pela “otimização 1”, e a segunda parte apresentará os resultados obtidos pela “otimização 2”.

A exatidão do algoritmo de localização é medida pelo erro de distância calculado em metros (m) como mostra a equação 74:

$$\varepsilon_{(m)} = \left| d_{real(m)} - x_{estimada(m)} \right| \quad (74)$$

Onde:

$d_{real(m)}$: é a distância real de ocorrência da falta em metros.

$x_{estimada(m)}$: é a distância estimada da falta em metros.

Também é apresentado o erro do algoritmo de localização de faltas na forma percentual, tendo como base o comprimento de cada linha de transmissão.

Inicialmente são apresentados os resultados de localização de falta para a linha de transmissão de 138 [kV], que é constituída por um circuito duplo. Na sequência são apresentados os resultados das linhas de transmissão de 230, 500 e 765 [kV], todas elas constituídas por circuito simples.

5.2.1 Resultados para a linha de transmissão de 138 [kV]

Os erros de distância máximo ($\epsilon_{máx}$), mínimo ($\epsilon_{mín}$), médio (ϵ_{med}) e desvio padrão (ϵ_{desv}) para esta linha de transmissão, fornecidos pelo PS não apresentam uma grande diferença quando comparados com os valores fornecidos pelo AG.

□ Otimização 1

Os resultados obtidos para a função objetivo que otimiza a diferença de tensões no ponto de falta ($\Delta \dot{V}_{abc}^F$), são apresentados na tabela 10. Estes resultados mostram independentemente do tipo e resistência de falta que o erro máximo de distância de falta é de 1663 metros e maior erro médio é de 806 metros, calculado pelo PS. Enquanto o AG apresenta erro máximo de 1024 metros e maior erro médio de 369 metros. O erro mínimo de distância de falta calculado tanto pelo PS quanto pelo AG é de zero metros, ou seja, isso indica que o algoritmo proposto localizou o ponto exato de ocorrida a falta.

Tabela 10: Erros de distância de falta em metros (m), “otimização 1” - 138 [kV].

LT 138 [kv] 74 km	Erros de distância [m]								
	PS					AG			
	R_F [Ω]	$\epsilon_{m\acute{a}x}$	$\epsilon_{m\acute{i}n}$	ϵ_{med}	ϵ_{desv}	$\epsilon_{m\acute{a}x}$	$\epsilon_{m\acute{i}n}$	ϵ_{med}	ϵ_{desv}
AN	0,01	339	2	96	99	339	3	96	99
	1	146	3	45	40	146	3	45	40
	2	144	3	47	42	144	3	47	42
	5	135	0	48	42	135	0	48	42
	20	97	2	43	30	96	2	43	30
	50	182	3	58	48	181	3	58	48
BC	0,01	155	5	64	53	155	5	64	53
	1	153	0	65	52	153	0	65	52
	2	151	3	65	49	151	3	65	49
BCN	0,01	195	5	58	57	191	6	59	54
	1	812	244	412	179	564	29	199	151
	2	1436	500	806	311	438	1	179	128
ABC	0,01	65	2	20	21	65	2	20	21
	1	194	3	52	53	183	4	54	48
	2	477	30	155	137	387	27	144	120
	5	1663	138	611	503	1024	82	369	302

Fonte: Autor.

A diferença entre os resultados obtidos pelo PS e AG mostra que as duas ferramentas de otimização possuem uma alta precisão, apresentando o AG uma pequena melhor solução ótima global embora possua um maior tempo computacional para convergir ao valor final, conforme é mostrado pela tabela 11 que também mostra os erros de distância de falta percentual.

Tabela 11: Erros de distância de falta percentual (%), “otimização 1” - 138 [kV].

Tipos de Falta	Erro de distância de Falta Percentual [%]				Tempo médio de Convergência [segundos]
	Máx.	Mín.	Média	Desvio Padrão	
AN	0,45	0,0011	0,0764	0,0771	PS = 4,61 AG = 40,23
BC	0,20	0,0009	0,0880	0,0686	
BCN	1,94	0,0070	0,5753	0,5017	
ABC	2,24	0,0039	0,2837	0,4735	

Fonte: Autor.

O erro máximo percentual que mostra a tabela 11 é de 2,24% do comprimento da linha de transmissão, também pode-se observar que o erro mínimo é praticamente

igual a 0% e os erros médio e desvio padrão ficam embaixo de 1%. O tempo médio de convergência para o PS é de 4,61 segundos e para o AG é de 40,23 segundos.

Em base aos resultados apresentados pela tabela 10, é elaborado o histograma de erros de distância de falta em relação ao percentual de número de casos simulados para cada tipo de curto-circuito. Esse histograma é ilustrado a seguir pela figura 46.

Figura 46: Histograma dos resultados obtidos para a LT - 138 [kV], “otimização 1”.

Fonte: Autor.

Pode-se observar no histograma ilustrado pela figura 46, que cerca de 98% dos casos simulados para curtos-circuitos fase-terra e dupla-fase apresentam erros de distância inferiores a 200 metros. Os casos simulados para os curtos-circuitos trifásico e dupla-fase-terra apresentam erros de distância inferiores aos 1000 metros.

A título de exemplo, a figura 47 apresenta a superfície da função objetivo ($\Delta \dot{V}_{abc}^F$) da “otimização 1”, que representa a diferença de tensão no ponto de ocorrência da falta, que têm como resposta a localização de uma falta fase-terra AN a 44,4 quilômetros do terminal local da linha de transmissão de 138 [kV] com uma resistência de falta de 20 ohms.

A continuação na página seguinte é apresentada a superfície da função objetivo correspondente a “otimização 1”, ilustrada pela figura 47.

Figura 47: Superfície da função objetivo “otimização 1” para uma falta fase-terra AN na LT - 138 [kV] a 44,4 km do terminal local com resistência de falta de 20Ω .

Fonte: Autor.

□ Otimização 2

Os resultados obtidos para a função objetivo que otimiza no terminal local da linha $(\Delta \dot{V}_{abc}^L + \Delta \dot{I}_{abc}^L)_{pu}$, são apresentados pela tabela 12. Mostrando independentemente do tipo e resistência de falta que o erro máximo de distância de falta é de 3650 metros e maior erro médio é de 1486 metros calculado pelo PS, enquanto o AG apresenta um erro máximo de distância de falta de 3635 metros e maior erro médio de 1485 metros. O erro mínimo de distância de falta calculado tanto pelo PS quanto pelo AG é de 1 metro, ou seja, isso indica que o algoritmo proposto localizou praticamente no ponto exato de ocorrência da falta.

É realizada uma comparação entre as tabelas 10 e 12, e nota-se uma pequena diferença nos resultados, isto é, devido que existem diferentes funções objetivo utilizadas. Mesmo assim observa-se que tanto as duas funções objetivo usadas quanto as duas ferramentas de otimização aplicadas possuem uma alta precisão na localização da falta.

Também é possível observar que apesar de utilizar a função de “otimização 2”, os resultados obtidos pelo AG apresentam uma pequena melhor solução ótima global em comparação com os resultados do PS, mas possui um maior tempo computacional conforme é mostrado pela tabela 13 que indica os erros de distância percentual.

Tabela 12: Erros de distância de falta em metros (m), “otimização 2” - 138 [kV].

LT 138 [kv] 74 km	Erros de distância [m]								
	PS					AG			
	R_F [Ω]	$\epsilon_{m\acute{a}x}$	$\epsilon_{m\acute{i}n}$	ϵ_{med}	ϵ_{desv}	$\epsilon_{m\acute{a}x}$	$\epsilon_{m\acute{i}n}$	ϵ_{med}	ϵ_{desv}
AN	0,01	1850	5	313	526	1850	6	313	99
	1	667	73	225	175	667	73	225	40
	2	839	52	265	226	839	52	265	42
	5	1336	8	495	413	1336	8	497	42
	20	3507	157	1360	966	3505	157	965	840
	50	3650	276	1486	997	3635	276	1485	996
BC	0,01	1345	30	499	419	1336	31	499	418
	1	1724	368	927	390	1724	368	926	390
	2	1657	388	935	365	1657	388	935	365
BCN	0,01	1344	3	441	435	1356	1	441	436
	1	885	297	571	186	919	262	573	220
	2	965	316	622	206	951	316	622	206
ABC	0,01	1141	1	420	395	1177	1	471	393
	1	937	302	639	205	937	302	661	205
	2	1152	424	829	255	1073	424	710	245
	5	1829	299	988	498	1829	299	987	412

Fonte: Autor.

A tabela 13 mostra que os resultados percentuais obtidos pela função de “otimização 2” apresentam um erro máximo percentual de 4,93% do comprimento da linha de transmissão, também pode-se observar que o erro mínimo é praticamente igual a 0% e os erros médio e desvio padrão ficam embaixo de 1%. O tempo médio de convergência para o PS é de 1,05 segundos e para o AG é de 218,79 segundos.

Tabela 13: Erros de distância de falta percentual (%), “otimização 2” - 138 [kV].

Tipos de Falta	Erro de distância de Falta Percentual [%]				Tempo médio de Convergência [segundos]
	Máx.	Mín.	Média	Desvio Padrão	PS = 1,05 AG = 218,79
AN	4,93	0,007	0,73	0,99	
BC	2,3	0,041	1,06	0,58	
BCN	1,81	0,005	0,73	0,40	
ABC	2,47	0,001	1,02	0,59	

Fonte: Autor.

Em base aos resultados apresentados pela tabela 12, é elaborado o histograma de erros de distância de falta obtidos pela “otimização 2” em relação ao percentual

de número de casos simulados para cada tipo de curto-circuito. Esse histograma é ilustrado a seguir pela figura 48, e pode-se observar que cerca de 75% dos casos simulados para os tipos de falta fase-terra, dupla-fase, dupla-fase-terra e trifásica apresentam erros de distância inferiores a 1000 metros.

Figura 48: Histograma dos resultados obtidos para LT-138kV, “otimização 2”.

Fonte: Autor.

5.2.2 Resultados para a linha de transmissão de 230 [kV]

Os resultados para esta linha de transmissão tais como: os erros de distância máximo ($\epsilon_{m\acute{a}x}$), mínimo ($\epsilon_{m\acute{i}n}$), médio (ϵ_{med}) e desvio padrão (ϵ_{desv}), fornecidos pelo PS não apresentam uma grande diferença quando comparados com os valores fornecidos pelo AG.

□ Otimização 1

Os resultados obtidos para a função objetivo que otimiza a diferença de tensões no ponto de falta ($\Delta \dot{V}_{abc}^F$), são apresentados na tabela 14. Esses resultados mostram independentemente do tipo e resistência de falta que o erro máximo de distância de falta é de 3317 metros calculado pelo PS, enquanto o AG apresenta um erro máximo de 3316 metros. O maior erro médio de distância de falta é de 1374 metros e erro mínimo de 2 metros, calculado tanto pelo PS quanto pelo AG.

Tabela 14: Erros de distância de falta em metros (m), “otimização 1” - 230 [kV].

LT 138 [kv] 74 km	Erros de distância [m]								
	PS					AG			
	R_F [Ω]	$\epsilon_{m\acute{a}x}$	$\epsilon_{m\acute{i}n}$	ϵ_{med}	ϵ_{desv}	$\epsilon_{m\acute{a}x}$	$\epsilon_{m\acute{i}n}$	ϵ_{med}	ϵ_{desv}
AN	0,01	556	3	170	173	556	3	170	173
	1	700	3	299	245	700	3	299	245
	2	1380	128	574	445	1380	128	574	445
	5	3317	352	1374	1065	3316	352	1374	1065
BC	0,01	1259	29	481	469	1259	29	481	469
	1	1565	13	406	484	1565	13	406	484
	2	1934	23	491	632	1934	23	491	632
BCN	0,01	1256	16	460	478	1256	16	460	478
	1	1597	15	411	491	1598	15	412	491
	2	1968	2	505	644	1968	2	505	645
ABC	0,01	2458	4	732	978	2788	4	763	1042
	1	2077	21	658	865	2097	2	675	871
	2	1823	93	733	722	1885	115	825	753
	5	2594	257	1171	852	3080	324	1360	979

Fonte: Autor.

A diferença entre os resultados obtidos pelo PS e AG mostra que as duas ferramentas de otimização possuem uma alta precisão, indicando que os resultados de localização falta obtidos pelo AG apresentam uma pequena melhor solução ótima global em comparação aos resultados obtidos pelo PS. Embora o AG possua um maior tempo computacional para convergir ao valor final, conforme mostra-se na tabela 15 que também apresenta os erros de distância de falta percentual.

Tabela 15: Erros de distância de falta percentual (%), “otimização 1” - 230 [kV].

Tipos de Falta	Erro de distância de Falta Percentual [%]				Tempo médio de Convergência [segundos]
	Máx.	Mín.	Média	Desvio Padrão	
AN	3,82	0,0037	0,7558	0,9368	PS = 1,36 AG = 14,01
BC	2,41	0,0174	0,5749	0,9368	
BCN	2,46	0,0035	0,5742	0,6663	
ABC	3,24	0,0053	1,0298	1,0793	

Fonte: Autor.

O erro máximo percentual que mostra a tabela 15 é de 3,82% do comprimento da linha de transmissão, também pode-se observar que o erro mínimo percentual é praticamente igual a 0%, e os erros médio e desvio padrão ficam abaixo de 1%. O

tempo médio de convergência para o PS é de 1,36 segundos e para o AG é de 14,01 segundos.

Em base aos resultados apresentados pela tabela 14, é elaborado o histograma de erros de distância de falta em relação ao percentual de números de casos simulados para cada tipo de curto-circuito. Esse histograma é ilustrado a seguir pela figura 49.

Figura 49: Histograma dos resultados obtidos para a LT - 230 [kV], “otimização 1”.

Fonte: Autor.

Pode-se observar no histograma ilustrado pela figura 49, que cerca de 70% dos casos simulados para curtos-circuitos fase-terra, dupla-fase e dupla-fase-terra, e cerca de 60% dos casos simulados para curto-circuito trifásico, apresentam erros de distância de falta inferiores a 400 metros, considerado pequeno quando comparado com o comprimento da linha de transmissão que é de 80 km.

A título de exemplo, a figura 50 apresenta a superfície da função objetivo ($\Delta \dot{V}_{abc}^F$) da “otimização 1”, que representa a diferença de tensão no ponto de ocorrência da falta, que têm como resposta a localização de uma falta dupla-fase BC a 32 quilômetros do terminal local da linha de transmissão de 230 [kV] com uma resistência de falta de 2 ohms.

A continuação na página seguinte é apresentada a superfície da função objetivo correspondente a “otimização 1”, ilustrada pela figura 50.

Figura 50: Superfície da função objetivo “otimização 1” para uma falta dupla-fase BC na LT - 230 [kV] a 32 km do terminal local com resistência de falta de 2Ω .

Fonte: Autor.

□ Otimização 2

Os resultados obtidos para a função objetivo que otimiza no terminal local da linha $(\Delta \dot{V}_{abc}^L + \Delta \dot{I}_{abc}^L)_{pu}$ são apresentados pela tabela 16. Mostrando independentemente do tipo e resistência de falta que o erro máximo de distância de falta é de 3896 metros calculado pelo PS enquanto pelo AG apresenta um erro máximo de 3885 metros. O maior erro médio de distância de falta calculado por ambas as ferramentas de otimização é de 2034 metros, e o erro mínimo é de zero metros, ou seja, isso indica que o algoritmo proposto localizou praticamente no ponto exato de ocorrida a falta. É realizada uma comparação entre as tabelas 14 e 16, e nota-se uma pequena diferença nos resultados, isto é, devido que existem diferentes funções objetivo utilizadas. Mesmo assim observa-se que tanto as duas funções objetivo usadas quanto as duas ferramentas de otimização aplicadas possuem uma alta precisão na localização da falta.

Também é possível observar que apesar de utilizar a função de “otimização 2”, os resultados obtidos pelo AG apresentam uma pequena melhor solução ótima global em comparação com os resultados do PS, mas possui um maior tempo computacional conforme é mostrado pela tabela 17 que indica os erros de distância percentual.

Tabela 16: Erros de distância de falta em metros (m), “otimização 2” - 230 [kV].

LT 138 [kv] 74 km	Erros de distância [m]								
	PS					AG			
	R_F [Ω]	$\epsilon_{m\acute{a}x}$	$\epsilon_{m\acute{i}n}$	ϵ_{med}	ϵ_{desv}	$\epsilon_{m\acute{a}x}$	$\epsilon_{m\acute{i}n}$	ϵ_{med}	ϵ_{desv}
AN	0,01	1593	13	529	459	1593	13	529	459
	1	2197	15	718	594	2197	15	718	594
	2	2876	55	962	803	2876	122	962	803
	5	3896	0	2034	1631	3885	0	2034	1631
BC	0,01	3371	25	1093	964	3770	25	1093	964
	1	3410	111	1910	1308	3410	111	1910	1308
	2	3484	145	1805	1128	3484	145	1805	1228
BCN	0,01	1057	5	315	293	1057	5	315	293
	1	1355	18	321	336	1355	0	316	335
	2	1438	29	373	392	1438	0	396	390
ABC	0,01	1574	32	356	476	1569	23	362	484
	1	944	16	435	288	985	0	365	250
	2	1237	50	489	359	962	36	315	245
	5	1730	46	508	439	1735	35	550	620

Fonte: Autor.

A tabela 17 mostra que os resultados percentuais obtidos pela função de “otimização 2” apresentam um erro máximo percentual de 4,87% do comprimento da linha de transmissão, também pode-se observar que o erro mínimo é praticamente igual a 0% e os erros médio e desvio padrão ficam abaixo de 2%. O tempo médio de convergência para o PS é de 1,09 segundos e para o AG é de 123,07 segundos.

Tabela 17: Erros de distância de falta percentual (%), “otimização 2” - 230 [kV].

Tipos de Falta	Erro de distância de Falta Percentual [%]				Tempo médio de Convergência [segundos]
	Máx.	Mín.	Média	Desvio Padrão	
AN	4,87	0,0160	1,98	1,608	PS = 1,09 AG = 123,07
BC	4,35	0,0310	1,72	1,062	
BCN	1,79	0,0065	0,42	0,421	
ABC	2,16	0,0203	0,55	0,490	

Fonte: Autor.

Em base aos resultados apresentados na tabela 16, é elaborado o histograma de erros de distância de falta obtidos pela “otimização 2” em relação ao percentual de número de casos simulados para cada tipo de curto-circuito. Esse histograma é ilustrado pela figura 51, e pode-se observar que cerca de 90% dos casos simulados para os

tipos de falta dupla-fase-terra e trifásica apresentam erros de distância de falta inferiores a 800 metros e os casos simulados para os tipos de falta fase-terra e dupla-fase apresentam erros de distância de falta inferior a 1600 metros, considerando-se pequenos quando comparados com o comprimento da linha de transmissão igual a 80 km.

Figura 51: Histograma dos resultados obtidos para LT-230kV, “otimização 2”.

Fonte: Autor.

5.2.3 Resultados para a linha de transmissão de 500 [kV]

Os resultados para esta linha de transmissão tais como: os erros de distância máximo ($\epsilon_{m\acute{a}x}$), mínimo ($\epsilon_{m\acute{i}n}$), médio (ϵ_{med}) e desvio padrão (ϵ_{desv}), fornecidos pelo PS também não apresentam uma grande diferença quando comparados com os valores fornecidos pelo AG.

□ Otimização 1

Os resultados obtidos pelo algoritmo de localização de faltas otimizando no ponto de falta ($\Delta \dot{V}_{abc}^F$) são apresentados na tabela 18. Mostrando independentemente do tipo e resistência de falta que o erro máximo de distância de falta é de 5321 metros calculado tanto pelo PS quanto pelo AG, considerado pequeno quando comparado

ao comprimento da linha de transmissão igual a 181 km. O maior erro médio de distância de falta é de 2234 metros e erro mínimo de 11 metros, calculado tanto pelo PS quanto pelo AG.

Tabela 18: Erros de distância de falta em metros (m), “otimização 1” - 500 [kV].

LT 138 [kv] 74 km	Erros de distância [m]								
	PS					AG			
	R_F [Ω]	$\epsilon_{m\acute{a}x}$	$\epsilon_{m\acute{i}n}$	ϵ_{med}	ϵ_{desv}	$\epsilon_{m\acute{a}x}$	$\epsilon_{m\acute{i}n}$	ϵ_{med}	ϵ_{desv}
AN	0,01	3480	11	782	1021	3480	11	782	1021
	1	3393	203	1048	945	3393	203	1048	945
	2	3642	369	1343	970	3642	369	1343	970
	5	5321	683	2234	1371	5321	683	2234	1371
BC	0,01	2220	194	1151	653	2220	194	1151	653
	1	2277	101	800	602	2277	101	800	602
	2	2575	23	512	722	2575	23	512	722
BCN	0,01	3265	245	1946	998	3265	240	1941	990
	1	2841	307	1510	759	2807	368	1499	736
	2	2494	271	1169	574	2465	228	1170	574
ABC	0,01	1511	15	497	407	1119	118	539	284
	1	1215	58	400	286	1004	12	390	284
	2	991	20	348	286	1834	20	477	488
	5	2193	88	667	559	2193	92	667	558

Fonte: Autor.

A diferença entre os resultados obtidos pelo PS e AG mostra que as duas ferramentas de otimização possuem uma alta precisão, indicando que os resultados de localização de falta obtidos pelo AG apresentam uma pequena melhor solução ótima global em comparação aos resultados obtidos pelo PS. Embora o AG possua um maior tempo computacional para convergir ao valor final, conforme mostra-se na tabela 19 que também apresenta os erros de distância de falta percentual.

Tabela 19: Erros de distância de falta percentual (%), “otimização 1” - 500 [kV].

Tipos de Falta	Erro de distância de Falta Percentual [%]				Tempo médio de Convergência [segundos]
	Máx.	Mín.	Média	Desvio Padrão	
AN	2,90	0,0066	0,7471	0,6624	PS = 1,39 AG = 19,24
BC	1,42	0,0128	0,4538	0,3862	
BCN	1,80	0,1355	0,8519	0,4659	
ABC	1,21	0,0083	0,2643	0,2265	

Fonte: Autor.

O erro máximo percentual que mostra a tabela 19 é de 2,90% do comprimento da linha de transmissão, também pode-se observar que o erro mínimo percentual é praticamente igual a 0%, e os erros médio e desvio padrão ficam abaixo de 1%. O tempo médio de convergência para o PS de 1,39 segundos e para o AG de 19,24 segundos.

Em base aos resultados apresentados pela tabela 18, é elaborado o histograma de erros de distância de falta em relação ao percentual de números de casos simulados para cada tipo de curto-circuito. Esse histograma é ilustrado a seguir pela figura 52.

Figura 52: Histograma dos resultados obtidos para a LT - 500 [kV], “otimização 1”.

Fonte: Autor.

Pode-se observar no histograma ilustrado pela figura 52, que cerca de 70% dos casos simulados para curtos-circuitos fase-terra, dupla-fase e trifásica apresentam erros de distância inferiores a 800 metros, e para curtos-circuitos dupla-fase-terra apresenta erros de distância de falta inferiores a 3200 metros, considerado pequeno quando comparado com o comprimento da linha de transmissão igual a 181 km.

A título de exemplo, a figura 53 apresenta a superfície da função objetivo ($\Delta \dot{V}_{abc}^F$) da “otimização 1”, que representa a diferença de tensão no ponto de ocorrência da falta, que têm como resposta a localização de uma falta dupla-fase-terra BCN a

144,8 quilômetros do terminal local da linha de transmissão de 500 [kV] com uma resistência de falta de 0,01 ohms.

Figura 53: Superfície da função objetivo “otimização 1” para uma falta dupla-fase-terra BCN na LT - 500 [kV] a 144,8 km do terminal local com resistência de falta de 0,01Ω.

Fonte: Autor.

□ Otimização 2

Os resultados obtidos para a função objetivo que otimiza no terminal local da linha $(\Delta \dot{V}_{abc}^L + \Delta \dot{I}_{abc}^L)_{pu}$ são apresentados pela tabela 20. Mostrando independentemente do tipo e resistência de falta que o erro máximo de distância de falta é de 6623 metros calculado pelo PS, enquanto o AG apresenta um erro máximo de 6605 metros. O maior erro médio de distância de falta é de 3446 metros e o erro mínimo é de 18 metros, ou seja, pode-se dizer que o algoritmo proposto de localização de falta localizou praticamente o mais próximo do ponto de ocorrência da falta.

É realizada uma comparação entre as tabelas 18 e 20, e nota-se uma pequena diferença nos resultados, isto é, devido que existem diferentes funções objetivo utilizadas. Mesmo assim observa-se que tanto as duas funções objetivo usadas quanto as duas ferramentas de otimização aplicadas possuem uma alta precisão na localização da falta.

Também é possível observar que apesar de utilizar a função de “otimização 2”, os resultados obtidos pelo AG apresentam uma pequena melhor solução ótima global

Tabela 20: Erros de distância de falta em metros (m), “otimização 2” - 500 [kV].

LT 138 [kv] 74 km	Erros de distância [m]								
	PS					AG			
	R_F [Ω]	$\epsilon_{m\acute{a}x}$	$\epsilon_{m\acute{i}n}$	ϵ_{med}	ϵ_{desv}	$\epsilon_{m\acute{a}x}$	$\epsilon_{m\acute{i}n}$	ϵ_{med}	ϵ_{desv}
AN	0,01	4924	641	2237	1562	4915	638	2235	1561
	1	5635	665	2840	1672	5635	665	2840	1672
	2	5842	698	3204	2011	5840	698	3204	2010
	5	6623	715	3446	2112	6605	715	3445	2111
BC	0,01	4612	438	1943	1314	4612	438	1943	1314
	1	4366	998	2012	1187	4366	998	2012	1187
	2	4414	904	2376	1232	4414	904	2376	1232
BCN	0,01	2721	60	1104	881	2721	60	1104	881
	1	2366	58	922	779	2366	58	922	779
	2	1997	28	704	700	1995	25	701	698
ABC	0,01	2858	28	1096	837	2054	5	672	661
	1	2611	496	1216	688	1913	399	764	480
	2	2351	18	1070	757	1956	18	900	699
	5	2455	67	1137	973	2455	65	946	934

Fonte: Autor.

em comparação com os resultados do PS, mas possui um maior tempo computacional conforme é mostrado pela tabela 21 que indica os erros de distância percentual.

A tabela 21 mostra que os resultados percentuais obtidos pela função de “otimização 2” apresentam um erro máximo percentual de 3,65% do comprimento da linha de transmissão, também pode-se observar que o erro mínimo fica abaixo de 1,6%, e os erros médio e desvio padrão ficam abaixo de 2%. O tempo médio de convergência para o PS é de 0,95 segundos e para o AG é de 124,04 segundos.

Tabela 21: Erros de distância de falta percentual (%), “otimização 2” - 500 [kV].

Tipos de Falta	Erro de distância de Falta Percentual [%]				Tempo médio de Convergência [segundos]
	Máx.	Mín.	Média	Desvio Padrão	
AN	3,65	0,356	1,915	1,194	PS = 0,95 AG = 124,04
BC	2,54	0,245	1,274	0,691	
BCN	1,80	1,542	0,015	0,509	
ABC	1,57	0,010	0,623	0,445	

Fonte: Autor.

Em base aos resultados apresentados na tabela 20, é elaborado o histograma de erros de distância de falta obtidos pela “otimização 2” em relação ao percentual de número

de casos simulados para cada tipo de curto-circuito. Esse histograma é ilustrado pela figura 54, e pode-se observar que cerca de 75% dos casos simulados para os tipos de falta dupla-fase-terra e trifásica apresentam erros de distância inferiores a 1500 metros.

Figura 54: Histograma dos resultados obtidos para LT-500kV, “otimização 2”.

Fonte: Autor.

5.2.4 Resultados para a linha de transmissão de 765 [kV]

Os resultados para esta linha de transmissão tais como: os erros de distância máximo ($\epsilon_{m\acute{a}x}$), mínimo ($\epsilon_{m\acute{i}n}$), médio (ϵ_{med}) e desvio padrão (ϵ_{desv}), fornecidos pelo PS também não apresentam uma grande diferença quando comparados com os valores fornecidos pelo AG.

□ Otimização 1

Os resultados obtidos pelo algoritmo de localização de faltas otimizando no ponto de falta ($\Delta \dot{V}_{abc}^F$) são apresentados na tabela 22. Mostrando independentemente do tipo e resistência de falta que o erro máximo de distância de falta é de 9948 metros calculado tanto pelo PS quanto pelo AG, considerado razoavelmente pequeno quando comparado com o comprimento da linha de 256 km. O maior erro médio de

distância de falta é de 3552 metros e erro mínimo de 3 metros, calculado tanto pelo PS quanto pelo AG.

Tabela 22: Erros de distância de falta em metros (m), “otimização 1” - 765 [kV].

LT 138 [kv] 74 km	Erros de distância [m]								
	PS					AG			
	R_F [Ω]	$\epsilon_{m\acute{a}x}$	$\epsilon_{m\acute{i}n}$	ϵ_{med}	ϵ_{desv}	$\epsilon_{m\acute{a}x}$	$\epsilon_{m\acute{i}n}$	ϵ_{med}	ϵ_{desv}
AN	0,01	1508	7	425	485	1508	7	425	485
	1	1121	3	250	299	1121	3	250	299
	2	753	10	309	227	753	10	309	227
	5	2355	223	986	777	2355	223	986	777
	20	9948	1152	3552	2665	9948	1152	3552	2665
BC	0,01	6938	429	1853	2108	6938	429	1853	2108
	1	4828	268	1411	1437	4828	268	1411	1437
	2	5837	151	1649	1869	5837	151	1649	1869
BCN	0,01	3605	154	1306	1082	3605	154	1306	1082
	1	4920	262	1688	1510	4920	261	1688	1510
	2	3294	154	1275	1095	3293	153	1275	1095
ABC	0,01	3205	167	1337	865	3977	184	1489	1116
	1	4365	112	1817	1382	3849	120	1769	1255
	2	2255	59	1122	697	2216	100	1079	717
	5	2406	56	619	755	1871	31	624	573

Fonte: Autor.

A diferença entre os resultados obtidos pelo PS e AG mostra que as duas ferramentas de otimização possuem uma alta precisão, indicando que os resultados obtidos pelo AG apresentam uma pequena melhor solução ótima global em comparação com os resultados obtidos pelo PS. Embora possua um maior tempo computacional para convergir ao valor final, conforme mostra-se na tabela 23 que também apresenta os erros de distância de falta percentual.

Tabela 23: Erros de distância de falta percentual (%), “otimização 1” - 765 [kV].

Tipos de Falta	Erro de distância de Falta Percentual [%]				Tempo médio de Convergência [segundos]
	Máx.	Mín.	Média	Desvio Padrão	
AN	3,75	0,0011	0,4168	0,6667	PS = 3,63 AG = 15,93
BC	2,61	0,0571	0,6180	0,6778	
BCN	1,85	0,0582	0,5372	0,4654	
ABC	1,64	0,0212	0,4619	0,3909	

Fonte: Autor.

O erro máximo percentual que mostra a tabela 23 é de 3,75% do comprimento da linha de transmissão, também pode-se observar que o erro mínimo percentual é praticamente igual a 0%, e os erros médio e desvio padrão ficam abaixo de 1%. O tempo médio de convergência para o PS é de 3,63 segundos e para o AG é de 15,93 segundos.

Em base aos resultados apresentados pela tabela 22, é elaborado o histograma de erros de distância de falta em relação ao percentual de números de casos simulados para cada tipo de curto-circuito. Esse histograma é ilustrado pela figura 55.

Figura 55: Histograma dos resultados obtidos para a LT - 765 [kV], “otimização 1”.

Fonte: Autor.

Nesse histograma observa-se que cerca de 80% dos casos simulados para curtos-circuitos fase-terra, dupla-fase, dupla-fase-terra e trifásica apresentam erros de distância inferiores a 1500 metros, considerado pequeno quando comparado com o comprimento da linha de transmissão igual a 256 km.

A título de exemplo, a figura 56 apresenta a superfície da função objetivo ($\Delta \dot{V}_{abc}^F$) da “otimização 1”, que representa a diferença de tensão no ponto de ocorrência da falta, que têm como resposta a localização de uma falta trifásica ABC a 106 quilômetros do terminal local da linha de transmissão de 765 [kV] com uma resistência de falta de 2 ohms.

Figura 56: Superfície da função objetivo “otimização 1” para uma falta trifásica ABC na LT - 765 [kV] a 106 km do terminal local com resistência de falta de 2Ω .

Fonte: Autor.

□ Otimização 2

Os resultados obtidos para a função objetivo que otimiza no terminal local da linha $(\Delta \dot{V}_{abc}^L + \Delta \dot{I}_{abc}^L)_{pu}$ são apresentados pela tabela 24. Mostrando independentemente do tipo e resistência de falta um erro máximo de distância de falta de 9543 metros calculado pelo PS, enquanto o AG apresenta um erro máximo de 9321 metros. O maior erro médio de distância de falta é de 5242 metros, o maior erro desvio padrão é de 3085 metros, e o erro mínimo é de 16 metros calculado por ambas as ferramentas de otimização.

É realizada uma comparação entre as tabelas 22 e 24, e nota-se uma pequena diferença nos resultados, isto é, devido que existem diferentes funções objetivo utilizadas. Mesmo assim observa-se que tanto as duas funções objetivo usadas quanto as duas ferramentas de otimização aplicadas possuem uma alta precisão na localização da falta.

Também é possível observar que apesar de utilizar a função de “otimização 2”, os resultados obtidos pelo AG apresentam uma pequena melhor solução ótima global quando comparado com os resultados obtidos pelo PS, mas possui um maior tempo computacional conforme é mostrado pela tabela 25 que indica os erros de distância percentual.

Tabela 24: Erros de distância de falta em metros (m), “otimização 2” - 765 [kV].

LT 138 [kv] 74 km	Erros de distância [m]								
	PS					AG			
	R_F [Ω]	$\epsilon_{m\acute{a}x}$	$\epsilon_{m\acute{i}n}$	ϵ_{med}	ϵ_{desv}	$\epsilon_{m\acute{a}x}$	$\epsilon_{m\acute{i}n}$	ϵ_{med}	ϵ_{desv}
AN	0,01	7540	560	3645	2844	7540	560	3645	2844
	1	7821	315	3240	2458	7821	315	3240	2458
	2	8245	521	3524	2659	8245	521	3524	2659
	5	8596	884	4497	2820	8596	884	4497	2820
	20	9543	964	4789	3085	9321	964	4789	3085
BC	0,01	8604	1160	4738	2417	8604	1160	4738	2417
	1	9056	1149	5242	2960	9056	1149	5242	2960
	2	8610	96	5033	2971	8610	96	5032	2971
BCN	0,01	6057	18	1738	2020	6057	18	1735	1949
	1	6342	96	1641	2113	6342	87	1640	2001
	2	8699	240	1950	2800	8699	231	1950	2741
ABC	0,01	2598	16	943	902	2583	16	896	886
	1	2709	41	1058	1032	2398	41	740	824
	2	2633	90	1374	922	2622	125	1305	821
	5	2740	556	1556	888	2250	556	1341	626

Fonte: Autor.

A tabela 25 mostra os resultados percentuais obtidos pela função de “otimização 2”, indicando um erro máximo percentual de 3,72% do comprimento da linha de transmissão, também pode-se observar que o erro mínimo percentual é praticamente igual a 0% e os erros médio e desvio padrão ficam abaixo de 2%. O tempo médio de convergência para o PS é de 1,30 segundos e para o AG é de 123,67 segundos.

Tabela 25: Erros de distância de falta percentual (%), “otimização 2” - 765 [kV].

Tipos de Falta	Erro de distância de Falta Percentual [%]				Tempo médio de Convergência [segundos]
	Máx.	Mín.	Média	Desvio Padrão	
AN	3,72	0,331	1,921	1,152	PS = 1,30 AG = 123,67
BC	3,41	0,035	1,887	1,030	
BCN	3,28	0,006	0,670	0,861	
ABC	1,03	0,006	0,465	0,357	

Fonte: Autor.

O histograma de erros de distância de falta obtidos pela “otimização 2”, é ilustrado pela figura 57, apresentando resultados em relação ao percentual de número de casos simulados para cada tipo de curto-circuito. Nesse histograma pode-se observar

que cerca de 80% dos casos simulados para os tipos de falta fase-terra, dupla-fase, dupla-fase-terra e trifásica apresentam erros de distância inferiores a 2000 metros, considerado pequeno quando comparado com o comprimento da linha de transmissão igual a 256 km.

Figura 57: Histograma dos resultados obtidos para LT-765kV, “otimização 2”.

Fonte: Autor.

5.3 Análise de robustez do algoritmo proposto

Inicialmente foram apresentados os resultados obtidos pelo algoritmo proposto, tanto para a “otimização 1” quanto para a “otimização 2”. Esses resultados demonstram o desempenho e o grau de precisão dos mesmos, diante da influência das diversas condições de operação das linhas de transmissão durante a ocorrência de uma falta, tais como: variação da distância da falta, variação do tipo e resistência da falta, instante de ocorrência e níveis de carregamentos alto e baixo. Nesta seção é realizada uma análise da robustez do algoritmo proposto frente a alterações nos parâmetros das linhas de transmissão, e alterações dos equivalentes de Thévenin ligados nos terminais da linha.

5.3.1 Influência na variação dos parâmetros da linha de transmissão

Nesse caso foi realizada a alteração nos parâmetros da linha de transmissão, isto é, tipo de estrutura da torre, espaçamento entre os condutores, características elétricas e posicionamento dos condutores. De tal forma a alterar os parâmetros elétricos da linha (resistência, reatância e capacitância), a fim de inserir erros nos parâmetros e testar desta maneira a robustez e precisão do algoritmo proposto.

A seguir, as tabelas 26 e 27 mostram os erros de distância de falta percentual para as linhas de transmissão de 138 e 230 [kV] respectivamente. Estes resultados foram obtidos pela função objetivo denominado “otimização 1”, pois este ultimo apresentou melhor maior exatidão quando comparado com a “otimização 2”.

Tabela 26: Erros de distância de falta percentual (%) com alteração nos parâmetros da linha, “otimização 1” - 138 [kV].

Tipos de Falta	Erro de distância de Falta Percentual [%]				Tempo médio de Convergência [segundos]
	Máx.	Mín.	Média	Desvio Padrão	
AN	4,57	0,8982	2,5458	1,2040	PS = 6,55 AG = 81,76
BC	0,47	0,0001	0,1206	0,1418	
BCN	2,84	0,0100	0,8905	0,7724	
ABC	1,80	0,0002	0,2504	0,3667	

Fonte: Autor.

A comparação entre as tabelas 11 e 27, mostra que com a inserção de erros com a alteração dos parâmetros da linha de transmissão de 138 [kV], o erro de distância máximo percentual aumentou para 4.57% e o maior erro médio para 2,54%, sendo considerados aceitáveis e pequenos quando comparados com o comprimento da linha.

Pode-se concluir que com a inserção de erros nos parâmetros da linha de transmissão, decorrentes de solos não homogêneos e outros efeitos, não influem significativamente na precisão do algoritmo proposto para localização de faltas. Os resultados também o comprovam para a linha de transmissão de 230 [kV], conforme é mostrado pela tabela 27 e comparado com a tabela 15. Apresentando erro percentual máximo de distância de falta de 4,68%, e maior erro médio de 1,95%, sendo considerados aceitáveis e pequenos em relação ao comprimento da linha.

Tabela 27: Erros de distância de falta percentual (%) com alteração nos parâmetros da linha, “otimização 1” - 230 [kV].

Tipos de Falta	Erro de distância de Falta Percentual [%]				Tempo médio de Convergência [segundos]
	Máx.	Mín.	Média	Desvio Padrão	
AN	3,90	0,3865	1,7073	0,9336	PS = 1,42 AG = 12,55
BC	4,01	0,0181	1,2300	1,1061	
BCN	4,07	0,0016	1,2697	1,1208	
ABC	4,68	0,4115	1,9543	1,3886	

Fonte: Autor.

5.3.2 Influência na variação dos equivalentes de Thévenin

Nesta seção, apresenta-se uma análise da robustez do algoritmo proposto para localização de faltas frente a variação dos equivalentes de Thévenin conectados aos terminais da linha. O modo de teste para verificar a robustez do algoritmo proposto, é basicamente na inserção de erros nos parâmetros dos equivalentes de Thévenin. Esta variação consiste em trocar os valores dos Thévenin remoto nos Thévenin local, isto é, inverter os parâmetros entre o equivalente Thévenin local e remoto.

A seguir, as tabelas 28 e 29 mostram os erros de distância de falta percentual para as linhas de transmissão de 138 e 230 [kV], respectivamente. Esses resultados foram obtidos utilizando a função objetivo denominada “otimização 1”.

Tabela 28: Erros de distância de falta percentual (%) com alteração nos equivalentes de Thévenin, “otimização 1” - 138 [kV].

Tipos de Falta	Erro de distância de Falta Percentual [%]				Tempo médio de Convergência [segundos]
	Máx.	Mín.	Média	Desvio Padrão	
AN	0,56	0	0,0842	0,0980	PS = 4,69 AG = 38,95
BC	0,19	0,0131	0,0815	0,0572	
BCN	2,29	0,0089	0,6687	0,6090	
ABC	2,14	0,0018	0,2299	0,4429	

Fonte: Autor.

A comparação entre as tabelas 11 e 28, mostra que com a inserção de erros com a alteração dos equivalentes de Thévenin da linha de transmissão de 138 [kV], o erro de distância máximo percentual é de 2.14%, sendo considerado aceitável e pequeno quando comparado com o comprimento da linha.

Tabela 29: Erros de distância de falta percentual (%) com alteração nos equivalentes de Thévenin, “otimização 1” - 230 [kV].

Tipos de Falta	Erro de distância de Falta Percentual [%]				Tempo médio de Convergência [segundos]
	Máx.	Mín.	Média	Desvio Padrão	
AN	4,80	0,0070	0,9129	1,1746	PS = 1,27 AG = 16,01
BC	2,26	0,0199	0,5222	0,5489	
BCN	2,28	0,0048	0,5301	0,5625	
ABC	4,53	0,0075	0,8606	1,1200	

Fonte: Autor.

Pode-se concluir que com a variação nos Thévenin equivalente local e remoto, não influem significativamente na precisão do algoritmo proposto para localização de faltas. Pois os resultados obtidos comprovam que para a linha de transmissão de 230 [kV], conforme é mostrado pela tabela 29 e comparado com a tabela 15. Apresentando erro percentual máximo de distância de falta de 4,8%, sendo considerado aceitável e pequeno em relação ao comprimento da linha.

Conclusões

O presente trabalho apresentou o desenvolvimento de um algoritmo para localização de faltas em linhas de transmissão que utiliza dados de apenas um terminal da linha. Esse algoritmo é baseado em métodos heurísticos (algoritmos genéticos e *pattern search*), sendo capaz de identificar o ponto de ocorrência da falta utilizando fasores de tensões e correntes de pré e pós-falta, potências de curto-circuito monofásicas e trifásicas de ambos os terminais da linha, e parâmetros elétricos da linha de transmissão.

Um aspecto relevante a ser considerado é o emprego do modelo de parâmetros distribuídos da linha, de forma a representá-la o mais próximo possível da situação real. Isso significa que se procurou trabalhar com o mínimo possível de hipóteses simplificadoras no equacionamento matemático, reduzindo sobremaneira os erros na localização da falta devido a erros nos parâmetros da linha, ficando esses mais suscetíveis apenas às imprecisões decorrentes da obtenção dos fasores nos terminais e, eventualmente, do erro nos equivalentes de Thévenin dos terminais.

A principal contribuição desta dissertação foi o desenvolvimento do algoritmo de localização de faltas que é baseado em duas funções objetivo diferentes: a primeira consiste na diferença das tensões no ponto de falta ($\Delta \dot{V}_{abc}^F$), e a segunda consiste na diferença das tensões e correntes medidas ($\Delta \dot{V}_{abc}^L + \Delta \dot{I}_{abc}^L$), calculadas a partir da matriz de admitâncias nodais.

Vale ressaltar que as ferramentas de otimização utilizadas possuem naturezas heurísticas, e, portanto, são menos propensas a ficarem presas em valores mínimos locais, o que implica ainda uma maior eficiência e precisão na determinação da localização da falta.

O algoritmo de localização de faltas foi implementado utilizando-se o programa científico MATLAB e foi avaliado utilizando dados dos testes produzidos pelas simulações no software ATP/EMTP de quatro sistemas de transmissão distintos: 138, 230, 500 e 765 [kV].

Os resultados obtidos mostram a eficiência e precisão do algoritmo de localização de

faltas proposto, onde os erros obtidos são pequenos quando comparados ao comprimento das linhas de transmissão. Esses erros apresentam um grau de precisão satisfatório para ambos os métodos de otimização empregados, isto é, algoritmos genéticos e *Pattern Search*. O algoritmo proposto é adequado para todo tipo de falta em linhas de transmissão transpostas ou não, de circuito simples ou de circuito duplo.

Para o caso da função objetivo de “otimização 1”, os resultados apresentaram erros máximos de 2,24%, 3,82%, 2,90% e 3,75% relativos às linhas de transmissão de 138, 230, 500 e 765 [kV], respectivamente. E os resultados obtidos para a função objetivo da “otimização 2”, apresentaram erros máximos igual a 4,93%, 4,87%, 3,65% e 3,72% do comprimento de cada linha de transmissão, respectivamente. Portanto, pode-se dizer que a “otimização 1” apresentou erros máximos abaixo de 4%, e a “otimização 2” apresentou erros máximos abaixo de 5% do comprimento da linha de transmissão. Os erros mínimo, médio e desvio padrão apresentados pela “otimização 1” ficaram abaixo de 1%, e pela “otimização 2” ficaram abaixo de 2% do comprimento da linha de transmissão. Contudo isso, pode-se concluir que a “otimização 1” apresentou uma melhor exatidão para a localização da falta.

Observou-se que os erros de distância aumentam quando a resistência de falta aumenta e quando a distância da falta se aproxima ao comprimento da linha, ou seja, o ponto de falta fica próximo do terminal remoto da linha. Sendo lógico pois unicamente é utilizado medições do terminal local.

Outras fontes de erro cujos impactos na precisão do algoritmo proposto foram avaliados, são: as alterações dos parâmetros da linha de transmissão, e a variação dos equivalentes de Thévenin. Nesses casos os erros máximos de distância de falta ficaram abaixo de 5% do comprimento da linha de transmissão, mostrando que o algoritmo proposto para localização de faltas é insensível frente a essas alterações.

Concluindo de forma geral, baseando-se na análise de todos os resultados, pode-se escolher a “otimização 1” e a ferramenta de otimização do *Pattern Search*, por apresentarem uma melhor exatidão e menor tempo médio de convergência. Podendo ser implementado como uma função auxiliar de um IED, interesse principal das concessionárias de transmissão devido ao baixo custo de implementação.

Referências

- BEWLEY, L. V. Traveling waves on transmission systems. **American Institute of Electrical Engineers, Transactions of the**, 1931. IEEE, v. 50, n. 2, p. 532–550, 1931.
- BLICKLE, T.; THIELE, L. **A comparison of selection schemes used in genetic algorithms**. Zurich, Switzerland: Computer Engineering and Communication Networks Lab, 1995.
- BOWMAN, W. I.; MCNAMEE, J. M. Development of equivalent pi and t matrix circuits for long untransposed transmission lines. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, 1964. v. 6, n. 83, p. 625–632, 1964.
- CHENG, Y. et al. One-terminal impedance fault location algorithm for single phase to earth fault of transmission line. In: IEEE. **Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2010 Asia-Pacific**. [S.l.], 2010. p. 1–6.
- DAVOUDI, M. G.; SADEH, J.; KAMYAB, E. Time domain fault location on transmission lines using genetic algorithm. In: IEEE. **Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2012 11th International Conference on**. [S.l.], 2012. p. 1087–1092.
- DOMMEL, H. W. **Electromagnetic Transients Program: Reference Manual (EMTP theory book)**. [S.l.]: Bonneville Power Administration, 1986.
- _____. **ATP-EMTP Rule Book**. [S.l.], 1997.
- DUTTA, P.; ESMAEILIAN, A.; KEZUNOVIC, M. Transmission-line fault analysis using synchronized sampling. **Power Delivery, IEEE Transactions on**, 2014. IEEE, v. 29, n. 2, p. 942–950, 2014.
- ESHELMAN, L. J.; SCHAFFER, J. D. Real-coded genetic algorithms and interval-schemata. In: **Foundations of genetic algorithms**. [S.l.]: Morgan Kaufmann, 1993. v. 2.
- ESMAEILIAN, A. et al. A precise PMU based fault location method for multi terminal transmission line using voltage and current measurement. In: IEEE. **Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2011 10th International Conference on**. [S.l.], 2011. p. 1–4.

- FARSHAD, M.; SADEH, J. Accurate single-phase fault-location method for transmission lines based on k-nearest neighbor algorithm using one-end voltage. **Power Delivery, IEEE Transactions on**, 2012. IEEE, v. 27, n. 4, p. 2360–2367, 2012.
- GILLI, M.; WINKER, P. A review of heuristic optimization methods in econometrics. **Journal of Economic Literature**, 2008. n. 08-12, 2008.
- GOLBERG, D. E. **Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning**. [S.l.]: Addison Wesley, 1989.
- GONG, Y.; MYNAM, M.; GUZMÁN, A. Real-time multiterminal fault location system for transmission networks. In: IEEE. **Smart Grid Communications (SmartGridComm), 2011 IEEE International Conference on**. [S.l.], 2011. p. 558–563.
- GRAINGER, J. J.; STEVENSON, W. D. **Power system analysis**. New York: McGraw-Hill, 1994.
- GU, J.-C.; YU, S.-L. Removal of DC offset in current and voltage signals using a novel fourier filter algorithm. **Power Delivery, IEEE Transactions on**, 2000. IEEE, v. 15, n. 1, p. 73–79, 2000.
- HAUPT, R. L.; HAUPT, S. E. **Practical genetic algorithms**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2004.
- HAUPT, R. L.; WERNER, D. H. **Genetic algorithms in electromagnetics**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2007.
- HESSE, M. H. Electromagnetic and electrostatic transmission-line parameters by digital computer. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, 1963. IEEE, v. 82, n. 66, p. 282–291, 1963.
- HOLLAND, J. H. **Adaptation in Natural and Artificial Systems**. Ann Arbor, MI: University of Michigan Press, 1975.
- HOOKE, R.; JEEVES, T. A. Direct Search solution of numerical and statistical problems. **Journal of the ACM (JACM)**, 1961. ACM, v. 8, n. 2, p. 212–229, 1961.
- JAIN, A. et al. Fault classification and fault distance location of double circuit transmission lines for phase to phase faults using only one terminal data. In: IEEE. **Power Systems, 2009. ICPS'09. International Conference on**. [S.l.], 2009. p. 1–6.
- JAIN, A.; THOKE, A. S.; PATEL, R. N. Double circuit transmission line fault distance location using artificial neural network. In: IEEE. **Nature & Biologically Inspired Computing, 2009. NaBIC 2009. World Congress on**. [S.l.], 2009. p. 13–18.
- JANIKOW, C. Z.; MICHALEWICZ, Z. An experimental comparison of binary and floating point representations in genetic algorithms. In: **ICGA**. [S.l.: s.n.], 1991. p. 31–36.
- JIALE, S.; ZENGCHAO, W.; XIAONING, K. An accurate fault location algorithm based on parameter identification of linear differential equation using one terminal data. In: IEEE. **Advanced Power System Automation and Protection (APAP), 2011 International Conference on**. [S.l.], 2011. v. 1, p. 407–412.

- JIANG, Q.; WANG, B.; LI, X. An efficient PMU-based fault-location technique for multiterminal transmission lines. **Power Delivery, IEEE Transactions on**, 2014. IEEE, v. 29, n. 4, p. 1675–1682, 2014.
- KANG, N.; LIAO, Y. Double-circuit transmission-line fault location utilizing synchronized current phasors. **Power Delivery, IEEE Transactions on**, 2013. IEEE, v. 28, n. 2, p. 1040–1047, 2013.
- KAWA, M.; IZYKOWSKI, J. Two-end fault location on long transmission lines with in-line shunt reactors. In: IEEE. **PowerTech (POWERTECH), 2013 IEEE Grenoble**. [S.l.], 2013. p. 1–6.
- KORRES, G. N.; APOSTOLOPOULOS, C. A. Precise fault location algorithm for double-circuit transmission lines using unsynchronised measurements from two anti-parallel ends. **IET generation, transmission & distribution**, 2010. IET, v. 4, n. 7, p. 824–835, 2010.
- KUMAR, R.; KUMAR, S. A novel technique for impedance relay to locate fault in long transmission line. In: IEEE. **Engineering and Computational Sciences (RAECS), 2014 Recent Advances in**. [S.l.], 2014. p. 1–6.
- LIMA, D. A. C. et al. Electrical power systems fault location with one-terminal data using estimated remote source impedance. In: IEEE. **Power and Energy Society General Meeting (PES), 2013 IEEE**. [S.l.], 2013. p. 1–5.
- LIN, T.-C.; LIN, P.-Y.; LIU, C.-W. An algorithm for locating faults in three-terminal multisection nonhomogeneous transmission lines using synchrophasor measurements. **Smart Grid, IEEE Transactions on**, 2014. IEEE, v. 5, n. 1, p. 38–50, 2014.
- LINDEN, R. **Algoritmos genéticos (3a. edição)**. Rio de Janeiro, Brasil: Ciência Moderna Ltda., 2012.
- MANASSERO, G. J. **Sistema para localização de faltas em linhas de transmissão com subestações conectadas em derivação**. Tese (Doutorado) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 2006.
- MATHWORKS, G. A. **Direct Search toolbox**. Natick, MA, 2004.
- MICHALEWICZ, Z. **Genetic algorithms + data structures = evolution programs**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2013.
- OLESKOVICZ, M.; COURY, D. V.; AGGARWAL, R. K. O emprego de redes neurais artificiais na detecção, classificação e localização de faltas em linhas de transmissão. **SBA: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automática**, 2003. SciELO Brasil, v. 14, n. 2, p. 138–150, 2003.
- PEREIRA, C. E. de M.; ZANETTA, L. C. J. Fault location in transmission lines using one-terminal postfault voltage data. **Power Delivery, IEEE Transactions on**, 2004. IEEE, v. 19, n. 2, p. 570–575, 2004.
- SANTOS, R. C. dos. **Algoritmo Baseado em Redes Neurais Artificiais para a Proteção de Distância de Linhas de Transmissão**. Tese (Doutorado) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 2004.

SPEARS, W. M.; JONG, K. A. de. **An analysis of multi-point crossover**. Washington, DC, 1990.

SRINIVAS, M.; PATNAIK, L. M. Adaptive probabilities of crossover and mutation in genetic algorithms. **IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics**, 1994. IEEE, v. 24, n. 4, p. 656–667, 1994.

STRINGFIELD, T. W.; MARIHART, D. J.; STEVENS, R. F. Fault location methods for overhead lines. **Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems**, 1957. v. 3, n. 76, p. 518–529, 1957.

SYSWERDA, G. Uniform crossover in genetic algorithms. In: **Proceedings of the 3th International Conference in Genetic Algorithms**. [S.l.: s.n.], 1989. p. 1–9.

TAKAGI, T. et al. A new algorithm of an accurate fault location for EHV/UHV transmission lines: Part I-Fourier transformation method. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, 1981. v. 3, n. PAS-100, p. 1316–1323, 1981.

_____. 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**, 1982. IEEE, n. 3, p. 564–573, 1982.

_____. Development of a new type fault locator using the one-terminal voltage and current data. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, 1982. IEEE, n. 8, p. 2892–2898, 1982.

TANG, Y. et al. Fault indicators in transmission and distribution systems. In: IEEE. **Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, 2000. Proceedings. DRPT 2000. International Conference on**. [S.l.], 2000. p. 238–243.

TORCZON, V. On the convergence of pattern search algorithms. **SIAM Journal on optimization**, 1997. SIAM, v. 7, n. 1, p. 1–25, 1997.

WANG, B. et al. Novel location algorithm for single-line-to-ground faults in transmission line with distributed parameters. **Generation, Transmission & Distribution, IET**, 2013. IET, v. 7, n. 6, p. 560–566, 2013.

WRIGHT, A. H. Genetic algorithms for real parameter optimization. In: **Foundations of genetic algorithms**. [S.l.]: Morgan Kaufmann, 1991. v. 1, p. 205–218.

ZANETTA, L. C. J. **Transitórios eletromagnéticos em sistemas de potência**. São Paulo, Brasil: Editora - EdUSP, 2003. ISBN 9788531407550.

ZHANG, J.; ZHOU, H.; QIAN, J. A two-terminal fault location algorithm using asynchronous sampling based on genetic algorithm. In: IEEE. **Advanced Power System Automation and Protection (APAP), 2011 International Conference on**. [S.l.], 2011. v. 2, p. 1513–1516.

Anexos

Cálculo dos parâmetros do quadripolo de Transmissão.

A seguir apresentamos o cálculo dos parâmetros do quadripolo de transmissão $[A_{(x)}]$, $[B_{(x)}]$, $[C_{(x)}]$ e $[D_{(x)}]$, conforme mostrado na referência de (BOWMAN; MCNAMEE, 1964). A partir da solução não trivial da segunda equação diferencial de correntes da equação 33, apresentada no capítulo 4.1 deste trabalho, são obtidos os autovalores γ_j^2 e a matriz de autovetores $[M]$ de $[Q] = [\bar{y}_{abc}] \times [\bar{z}_{abc}]$. Sendo $[k]$ e $[n]$ constantes arbitrárias introduzidas na solução não trivial desse equacionamento, como mostra a equação 75.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{bmatrix} &= [M] \times \begin{bmatrix} \text{sen}(\gamma_1 \cdot x) & 0 & 0 \\ 0 & \text{sen}(\gamma_2 \cdot x) & 0 \\ 0 & 0 & \text{sen}(\gamma_3 \cdot x) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \end{bmatrix} + \\ &+ [M] \times \begin{bmatrix} \cos(\gamma_1 \cdot x) & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\gamma_2 \cdot x) & 0 \\ 0 & 0 & \cos(\gamma_3 \cdot x) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (75)$$

Representando a equação 75 na forma reduzida, obtem-se a seguinte forma:

$$[\dot{I}_{abc}] = [M] \times [\text{senh}(\gamma_j \cdot x)]_d \times [k] + [M] \times [\cosh(\gamma_j \cdot x)]_d \times [n] \quad (76)$$

Isolando a matriz de tensões da segunda equação diferencial da equação 29, obtem-se:

$$\frac{\partial [\dot{I}_{abc}]}{\partial x} = [\bar{y}_{abc}] \times [\dot{V}_{abc}] \rightarrow [\dot{V}_{abc}] = [\bar{y}_{abc}]^{-1} \times \frac{\partial [\dot{I}_{abc}]}{\partial x} \quad (77)$$

Derivando a equação 76 em relação a x e substituindo na equação 77 é obtida a matriz

de tensões, conforme mostra a seguinte equação.

$$\begin{aligned} [\dot{V}_{abc}] = & [\bar{y}_{abc}]^{-1} \times [M] \times [\gamma_j \cdot \cosh(\gamma_j \cdot x)]_d \times [k] + [\bar{y}_{abc}]^{-1} \times [M] \times \\ & \times [\gamma_j \cdot \sinh(\gamma_j \cdot x)]_d \times [n] \end{aligned} \quad (78)$$

As equações 76 e 78 possuem constantes arbitrárias $([k], [n])$, que devem ser determinadas a partir das condições iniciais, isto é, quando $x = 0$, $[\dot{I}_{abc}^L] = [\dot{I}_{abc}^R]$ e $[\dot{V}_{abc}^L] = [\dot{V}_{abc}^R]$. Sendo $[\dot{V}_{abc}^L]$, $[\dot{I}_{abc}^L]$ e $[\dot{V}_{abc}^R]$, $[\dot{I}_{abc}^R]$ as tensões e correntes no terminal local e remoto da linha de transmissão, respectivamente. Substituindo estas condições iniciais nas equações 76 e 78 obtém-se as constantes arbitrárias como mostra a equação 79.

$$\begin{cases} [k] = \left[\frac{1}{\gamma_j} \right] \times [M]^{-1} \times [\bar{y}_{abc}] \times [\dot{V}_{abc}^R] \\ [n] = [M]^{-1} \times [\dot{I}_{abc}^R] \end{cases} \quad (79)$$

Na sequência, é substituída a equação 79 nas equações 76 e 78. De forma a encontrar um equacionamento que relacione as tensões e correntes do terminal local e remoto, e as constantes do quadripolo de transmissão, conforme mostra a seguinte equação.

$$\begin{cases} [\dot{V}_{abc}^L] = [\bar{y}_{abc}]^{-1} \times [M] \times [\cosh(\gamma_j \cdot x)]_d \times [M]^{-1} \times [\bar{y}_{abc}] \times [\dot{V}_{abc}^R] + \\ \quad + [\bar{y}_{abc}]^{-1} \times [M] \times [\gamma_j \cdot \sinh(\gamma_j \cdot x)]_d \times [M]^{-1} \times [\dot{I}_{abc}^R] \\ [\dot{I}_{abc}^L] = x \cdot [M] \times \left[\frac{\sinh(\gamma_j \cdot x)}{(\gamma_j \cdot x)} \right]_d \times [M]^{-1} \times [\bar{y}_{abc}] \times [\dot{V}_{abc}^R] + \\ \quad + [\bar{y}_{abc}]^{-1} \times [M] \times [\cosh(\gamma_j \cdot x)]_d \times [M]^{-1} \times [\dot{I}_{abc}^R] \end{cases} \quad (80)$$

É a partir da equação 80 que é possível identificar as constantes do quadripolo de transmissão, mostrado pela equação 81.

$$\begin{cases} [A_{(x)}] = [\bar{y}_{abc}]^{-1} \times [M] \times [\cosh(\gamma_j \cdot x)]_d \times [M]^{-1} \times [\bar{y}_{abc}] \\ [B_{(x)}] = [\bar{y}_{abc}]^{-1} \times [M] \times [\gamma_j \cdot \sinh(\gamma_j \cdot x)]_d \times [M]^{-1} \\ [C_{(x)}] = x \cdot [M] \times \left[\frac{\sinh(\gamma_j \cdot x)}{(\gamma_j \cdot x)} \right]_d \times [M]^{-1} \times [\bar{y}_{abc}] \\ [D_{(x)}] = [M] \times [\cosh(\gamma_j \cdot x)]_d \times [M]^{-1} \end{cases} \quad (81)$$

apresenta a montagem da matriz de admitâncias nodais do sistema de transmissão com circuito duplo analisado para um total de oito nós.

$$[\bar{Y}_{Sistema}^{Circ.Duplo}] = [N]^t \times [\bar{Y}_{Sistema}^{Próprias}] \times [N] \quad (82)$$

Onde:

$[\bar{Y}_{Sistema}^{Circ.Duplo}]$: representa a matriz de admitâncias do sistema com circuito duplo.

$[\bar{Y}_{Sistema}^{Próprias}] = [\bar{Y}']$: representa a matriz de admitâncias próprias nodais do sistema.

$[N]$: representa a matriz de incidência dos ramos ligados nos nós do sistema.

A matriz de admitâncias próprias é constituída por matrizes de admitâncias de Thévenin equivalente local e remoto, matrizes de admitâncias dos trechos da linha de transmissão e matrizes de admitâncias de falta, conforme mostra-se a seguir.

$$[\bar{Y}'] = \begin{bmatrix} [\bar{Y}_L^{Th}] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] \\ [0] & [\bar{Y}_R^{Th}] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] \\ [0] & [0] & [\bar{Y}_{mL}] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] \\ [0] & [0] & [0] & [\bar{Y}_{mR}] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] \\ [0] & [0] & [0] & [0] & [\bar{Y}_2] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] \\ [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [\bar{Y}_1] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] \\ [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [\bar{Y}_3] & [0] & [0] & [0] & [0] \\ [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [\bar{Y}_5] & [0] & [0] & [0] \\ [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [\bar{Y}_4] & [0] & [0] \\ [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [\bar{Y}_6] & [0] \\ [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [\bar{Y}_{abc}^F] \end{bmatrix} \quad (83)$$

Onde:

$[\bar{Y}_L^{Th}]$, $[\bar{Y}_R^{Th}]$: são as matrizes de admitâncias de Thévenin equivalente local e remoto, respectivamente.

$[\bar{Y}_{2,5}]$, $[\bar{Y}_{1,3,4,6}]$: são as admitâncias series e paralelas de cada trecho da linha de transmissão, respectivamente.

$[\bar{Y}_{mL}]$, $[\bar{Y}_{mR}]$: são as admitâncias de medição nos terminais local e remoto, respectivamente.

$[\bar{Y}_{abc}^F]$: matriz de admitâncias de falta.

$[0]$: é a matriz de zeros.

A matriz de incidência representa a ligação dos ramos nos nós do sistema de transmissão, conforme mostra-se a seguir.

$$[N] = \begin{bmatrix} [I] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] \\ [0] & [0] & [0] & [0] & [I] & [0] & [0] & [0] \\ [I] & -[I] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] \\ [0] & [0] & [0] & -[I] & [I] & [0] & [0] & [0] \\ [0] & [I] & -[I] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] \\ [0] & [I] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] \\ [0] & [0] & [I] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] \\ [0] & [0] & -[I] & [I] & [0] & [0] & [0] & [0] \\ [0] & [0] & [I] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] \\ [0] & [0] & [0] & [I] & [0] & [0] & [0] & [0] \\ [0] & [0] & [I] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] \\ [I] & [0] & [0] & [0] & [0] & -[I] & [0] & [0] \\ [0] & [0] & [0] & [0] & [I] & [0] & [0] & -[I] \\ [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [I] & -[I] & [0] \\ [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [I] & [0] & [0] \\ [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [I] & [0] \\ [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & -[I] & [I] \\ [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [I] & [0] \\ [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [I] \\ [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [I] & [0] \end{bmatrix} \quad (84)$$

Onde:

$[I]$: é a matriz identidade.

$[0]$: é a matriz de zeros.

Dados das linhas de transmissão.

Um requisito importante para viabilizar a implementação prática do algoritmo proposto neste trabalho é que as situações operativas simuladas sejam referentes a sistemas de transmissão reais, desta forma foram adotados sistemas que abrangem os níveis de tensão mais usuais na prática assim como características físicas e elétricas típicas das linhas de transmissão como geometria da torre, flecha no meio de vão, arranjo e tipo de condutores. A seguir serão apresentadas as características das linhas de transmissão para os níveis de tensão respectivos.

C.1 Linha de Transmissão de 138 [kV] - Circuito Duplo.

□ Cabo condutor

- Circuito duplo com um condutor por fase;
- Flecha de 6,50 metros;
- Condutor (Partridge) tipo CAA 266,8 MCM.

□ Cabo guarda

- Flecha de 6,0 metros;
- Constituído por cabos de aço galvanizado (7 fios) tipo HS com diâmetro nominal de 1/2".

Resistividade do solo considerou-se o valor de $400 \Omega \cdot m$.

Figura 59: Linha de transmissão de 138 [kV] - Circuito duplo.

Fonte: Autor.

Tabela 30: Dados e características da linha de transmissão de 138 [kV].

	Diâmetro Interno	Diâmetro Externo	Resistência (25°C)
Cabo condutor	0,59944 cm	1,63068 cm	0,21752 Ω /km
Cabo guarda	0,0 cm	1,257 cm	3,045 Ω /km

Fonte: (SANTOS, 2004).

C.2 Linha de Transmissão de 230 [kV] - Circuito Simples.

□ Cabo condutor

Figura 60: Linha de transmissão de 230 [kV] - Circuito simples.

Fonte: Autor.

- Circuito simples com um condutor por fase;
- Flecha de 14,0 metros;
- Condutor (Drake) tipo ACSR 795 MCM (26/7).

□ Cabo guarda

- Flecha de 11,60 metros;
- Diâmetro de 5/16" (HS).

Resistividade do solo considerou-se o valor de $400 \Omega \cdot m$.

Tabela 31: Dados e características da linha de transmissão de 230 [kV].

	Diâmetro Interno	Diâmetro Externo	Resistência (25°C)
Cabo condutor	1,03634 cm	2,8143 cm	0,07271 Ω/km
Cabo guarda	0,0 cm	0,7937 cm	4,971 Ω/km

Fonte: (SANTOS, 2004).

C.3 Linha de Transmissão de 500 [kV] - Circuito Simples.

Figura 61: Linha de transmissão de 500 [kV] - Circuito simples.

Fonte: Autor.

□ Cabo condutor

- Circuito simples com três condutores por fase (igualmente espaçados em 18");
- Flecha de 11,40 metros;
- Condutor (Chukar) tipo ACSR 1780 MCM (84/19).

□ Cabo guarda

- Flecha de 6,30 metros;
- Diâmetro de 0,385" (Allumoweld).

Resistividade do solo considerou-se o valor de $400 \Omega \cdot m$.

Tabela 32: Dados e características da linha de transmissão de 230 [kV].

	Diâmetro Interno	Diâmetro Externo	Resistência (25°C)
Cabo condutor	1,109 cm	4,069 cm	0,03182 Ω/km
Cabo guarda	0,0 cm	0,978 cm	1,4626 Ω/km

Fonte: (SANTOS, 2004).

C.4 Linha de Transmissão de 765 [kV] - Circuito Simples.

Figura 62: Linha de transmissão de 765 [kV] - Circuito simples.

Fonte: Autor.

□ Cabo condutor

- Circuito simples com quatro condutores por fase (igualmente espaçados em 18");
- Flecha de 16,50 metros;
- Condutor (Dipper) tipo ACSR 1351,5 MCM (45/7).

□ Cabo guarda

- Flecha de 14,40 metros;
- Diâmetro de 0,385" (Allumoweld).

Resistividade do solo considerou-se o valor de $400 \, \Omega \cdot m$.

Tabela 33: Dados e características da linha de transmissão de 230 [kV].

	Diâmetro Interno	Diâmetro Externo	Resistência (25°C)
Cabo condutor	0,8813 cm	3,5204 cm	0,04166 Ω/km
Cabo guarda	0,0 cm	0,978 cm	1,4626 Ω/km

Fonte: (SANTOS, 2004).

Arquivo de entrada do ATP <.atp>

```

BEGIN NEW DATA CASE
C -----
C Generated by ATPDRAW setembro, sexta-feira 5, 2014
C A Bonneville Power Administration program
C Programmed by H. K. Høidalen at SEFAS - NORWAY 1994-2003
C -----
POWER FREQUENCY                60.
$DUMMY, XYZ000
C dT >> Tmax >> Xopt >> Copt >
  5.2E-6      .1
    100      100      1      1      1      0      0      1      0
C      1      2      3      4      5      6      7      8
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
/BRANCH
C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< L >< C >
  RFANL NL          0.0050
  RFBNL NL          2.5
  RFCNL NL          1.E-5
  RNL              0.0050
C Matriz de Impedancia Equivalente-LOCAL
C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< L >< C >
51VTH_LAZTH_LA      4.1906      94.5345
52VTH_LBZTH_LB      3.E-15      23.63314.1906      94.5345
53VTH_LCZTH_LC      3.E-15      23.63313.E-15      23.63314.1906      94.5345
C Matriz de Impedancia Equivalente-REMOTO
C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< L >< C >
51VTH_RAZTH_RA      .7618      38.7219
52VTH_RBZTH_RB      1.E-15      9.6803 .7618      38.7219
53VTH_R CZTH_RC      1.E-15      9.68031.E-15      9.6803 .7618      38.7219
C Trecho 10-20
$VINTAGE, 1
-1010L1A020L1A      4.04378E-01 8.41751E+02 1.97722E+05-1.60000E+01 1 3
-2010L1B020L1B      7.40372E-02 4.11372E+02 2.92873E+05-1.60000E+01 1 3
-3010L1C020L1C      7.35861E-02 3.59537E+02 2.94854E+05-1.60000E+01 1 3
$VINTAGE, 0
  0.59066463  0.70710678 -0.41095964
 -0.00136809  0.00000000 -0.00125248
  0.54974494  0.00000000  0.81376891
  0.00270905  0.00000000 -0.00116571
  0.59066463 -0.70710678 -0.41095964
 -0.00136809  0.00000000 -0.00125248
C Trecho 20-30

```

```

$VINTAGE, 1
-1020L1A030L1A          4.04378E-01 8.41751E+02 1.97722E+05-1.60000E+01 1 3
-2020L1B030L1B          7.40372E-02 4.11372E+02 2.92873E+05-1.60000E+01 1 3
-3020L1C030L1C          7.35861E-02 3.59537E+02 2.94854E+05-1.60000E+01 1 3
$VINTAGE, 0
  0.59066463  0.70710678 -0.41095964
-0.00136809  0.00000000 -0.00125248
  0.54974494  0.00000000  0.81376891
  0.00270905  0.00000000 -0.00116571
  0.59066463 -0.70710678 -0.41095964
-0.00136809  0.00000000 -0.00125248
C Trecho 30-40
$VINTAGE, 1
-1030L1A040L1A          4.04378E-01 8.41751E+02 1.97722E+05-1.60000E+01 1 3
-2030L1B040L1B          7.40372E-02 4.11372E+02 2.92873E+05-1.60000E+01 1 3
-3030L1C040L1C          7.35861E-02 3.59537E+02 2.94854E+05-1.60000E+01 1 3
$VINTAGE, 0
  0.59066463  0.70710678 -0.41095964
-0.00136809  0.00000000 -0.00125248
  0.54974494  0.00000000  0.81376891
  0.00270905  0.00000000 -0.00116571
  0.59066463 -0.70710678 -0.41095964
-0.00136809  0.00000000 -0.00125248
C Trecho 40-50
$VINTAGE, 1
-1040L1A050L1A          4.04378E-01 8.41751E+02 1.97722E+05-1.60000E+01 1 3
-2040L1B050L1B          7.40372E-02 4.11372E+02 2.92873E+05-1.60000E+01 1 3
-3040L1C050L1C          7.35861E-02 3.59537E+02 2.94854E+05-1.60000E+01 1 3
$VINTAGE, 0
  0.59066463  0.70710678 -0.41095964
-0.00136809  0.00000000 -0.00125248
  0.54974494  0.00000000  0.81376891
  0.00270905  0.00000000 -0.00116571
  0.59066463 -0.70710678 -0.41095964
-0.00136809  0.00000000 -0.00125248
C Trecho 50-60
$VINTAGE, 1
-1050L1A060L1A          4.04378E-01 8.41751E+02 1.97722E+05-1.60000E+01 1 3
-2050L1B060L1B          7.40372E-02 4.11372E+02 2.92873E+05-1.60000E+01 1 3
-3050L1C060L1C          7.35861E-02 3.59537E+02 2.94854E+05-1.60000E+01 1 3
$VINTAGE, 0
  0.59066463  0.70710678 -0.41095964
-0.00136809  0.00000000 -0.00125248
  0.54974494  0.00000000  0.81376891
  0.00270905  0.00000000 -0.00116571
  0.59066463 -0.70710678 -0.41095964
-0.00136809  0.00000000 -0.00125248
/SWITCH
C < n 1>< n 2>< Tclose ><Top/Tde >< Ie ><Vf/CLOP >< type >
  020L1ARFANL    0.01667      10.
  020L1BRFBNL      10.      -1.
  020L1CRFCNL      10.      -1.
  NL      RNL      0.01667      10.
  ZTH_LA010L1A                                MEASURING
  ZTH_LB010L1B                                MEASURING
  ZTH_LC010L1C                                MEASURING
  ZTH_RA060L1A                                MEASURING
  ZTH_RB060L1B                                MEASURING
  ZTH_RC060L1C                                MEASURING
/SOURCE

```

```

C < n 1><>< Ampl.  >< Freq.  ><Phase/T0><  A1  ><  T1  >< TSTART >< TSTOP  >
C Fonte de Tensão LOCAL
14VTH_LA 0  187800.      60.      -1.      10.
14VTH_LB 0  187800.      60.    -120.    -1.      10.
14VTH_LC 0  187800.      60.     120.    -1.      10.
C Fonte de Tensão REMOTO
14VTH_RA 0  187080.      60.    -23.250  -1.      10.
14VTH_RB 0  187080.      60. -143.2500  -1.      10.
14VTH_RC 0  187080.      60.  96.75000  -1.      10.
/OUTPUT
  ZTH_LAZTH_LBZTH_LCZTH_RAZTH_RBZTH_RC
BLANK BRANCH
BLANK SWITCH
BLANK SOURCE
BLANK OUTPUT
BLANK PLOT
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK

```