Universidade de São Paulo–USP Escola Politécnica

### Danilo de Souza Pereira

Localização de faltas em redes de distribuição no contexto de redes elétricas inteligentes utilizando algoritmos evolutivos

### Danilo de Souza Pereira

# Localização de faltas em redes de distribuição no contexto de redes elétricas inteligentes utilizando algoritmos evolutivos

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação de Engenharia Elétrica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências

### Danilo de Souza Pereira

# Localização de faltas em redes de distribuição no contexto de redes elétricas inteligentes utilizando algoritmos evolutivos

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação de Engenharia Elétrica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências

Área de concentração: Sistemas elétricos de potência

Orientador: Prof. Dr. Nelson Kagan Coorientador: Prof. Dr. Carlos Frederico Meschini Almeida

n relação à versão original, sob
anuência de seu orientador.
de

Catalogação-na-publicação

Pereira, Danilo de Souza Localização de faltas em redes de distribuição no contexto de redes elétricas inteligentes utilizando algoritmos evolutivos / D. S. Pereira -- versão corr. -- São Paulo, 2019. 137 p.
Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas.
1.Energia elétrica (qualidade e otimização) 2.Distribuição de energia elétrica 3.Redes de distribuição de energia elétrica 4.Algoritmos I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas II.t.

## Agradecimentos

Durante a condução desta pesquisa, algumas instituições e diversas pessoas foram fundamentais para os suportes intelectual, afetivo e financeiro. Ao meu orientador, professor Nelson Kagan, agradeço a oportunidade de participar dos projetos de pesquisa no Centro de Estudos em Regulação e Qualidade de Energia (Enerq/USP), além do incentivo, das sugestões e das dicas valiosas na condução deste trabalho.

Ao meu coorientador, professor Carlos Frederico Meschini Almeida, agradeço a motivação, o auxílio no desenvolvimento dessa dissertação bem como na produção dos artigos publicados. Estendo meus agradecimentos ao professor Luiz Henrique Leite Rosa, que contribuiu com discussões e questionamentos com relação a alguns pontos da pesquisa.

Aos amigos Paulo Radatz e Celso Rocha, agradeço as valiosas contribuições na utilização do simulador OpenDSS, bem como dicas e sugestões que foram fundamentais para atingir algumas etapas do trabalho.

À Fundação para o Desenvolvimento Tecnológico da Engenharia (FDTE), agradeço o apoio financeiro através da concessão de bolsa de mestrado. À Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (POLI-USP), agradeço a oportunidade de pertencer ao seu corpo discente de pós-gradução. Devo reconhecer a honra de ser aluno de tão distinta instituição de ensino e pesquisa.

A Deus agradeço a vida, a saúde e a paz, apesar das inconstâncias e dissabores desse processo. À minha esposa Jucélia, agradeço o incondicional apoio afetivo nos mais solitários momentos. Aos meus pais Orival e Mary, agradeço o amor, o suporte psicológico e o amparo em todos os momentos.

## Resumo

Este trabalho trata do desenvolvimento de uma metodologia e de uma ferramenta computacional de localização de faltas em sistemas elétricos de distribuição. Para tanto, considera-se o ambiente de Redes Elétricas Inteligentes, onde está à disposição uma grande diversidade de informações, como oscilografias de relés, dados de sensores, dados históricos, alarmes de medidores inteligentes, dentre outras. Convencionalmente, as metodologias de localização de defeitos em redes de distribuição se baseiam em conjuntos particulares de dados, que geralmente são medições apenas na saída do alimentador, e funcionam como uma ferramenta isolada no centro de operações. Este trabalho contribui para esse tema ao propor a Localização de Faltas como uma ferramenta de Automação Avançada, instalada em um Sistema de Gerenciamento da Distribuição. Ele deve estar integrado aos demais sistemas corporativos, dos quais obtém dados de medição, alarmes de atuação e indicação de eventos na rede, em tempo real. Um barramento de interoperabilidade permite a troca de informações entre os sistemas. O algoritmo de localização de faltas proposto considera os alarmes de atuação de chaves monitoradas, indicação de sensores, alarmes de ausência de tensão, dentre outras informações, para restringir ao máximo a área de busca do defeito. Por fim, uma implementação de Algoritmo Evolutivo permite estimar o local e a resistência de falta, a partir de testes de defeitos na área de busca. Nesse processo, os valores calculados são comparados com as medições obtidas dos respectivos pontos. Na etapa de aplicação da metodologia, foram consideradas algumas condições de monitoramento da rede elétrica: da condição de menor monitoramento ao cenário de maior monitoramento. Foi possível verificar como o aumento da quantidade de informações do sistema traz benefícios para a localização dos defeitos.

**Palavras-chave:** Localização de faltas. Redes elétricas inteligentes. Algoritmos evolutivos. Automação avançada da distribuição.

## Abstract

This work provides the development of a methodology and a computational tool for Fault Location (FL) in power distribution systems. The Smart Grid environment is considered, which provides a huge variety of information, such as relays waveforms, fault current sensors and historical data, smart meters alarms, among others. Conventionally, FL methodologies in power distribution systems are based on particular data sources, usually measurements at the beginning of the power feeder, which are not integrated with other corporate systems. This work contributes to the subject by proposing the FL as an Advanced Distribution Automation tool, to be installed in a Distribution Management System. As a part of the electric utility corporate systems, it obtains metering data, equipment alarms and events notifications, i.e. real time information. An Interoperability Bus (IB) allows the information exchange among the systems. The proposed FL algorithm considers monitored switches tripping alarms, current current sensors notifications, outage alarms, among other data, in order to narrow the search area as much as possible. Ultimately, an Evolutionary Algorithm (EA) implementation estimates the fault point and the fault resistance, through short-circuit tests and the search area. During that process, the computed electric quantities are compared with the measured ones at each monitored point. When applying the methodology for the case studies, some power grid monitoring conditions were considered: from the least monitored condition to the most monitored scenario. This made it possible to verify how the increase of power grid information benefits the FL algorithms.

**Keywords:** Fault location. Smart grids. Evolutionary algorithms. Advanced distribution automation.

# Lista de ilustrações

igura 1 – Cálculo da distância de falta	26
igura 2 – Esquema da captura de dados	28
igura 3 – Estrutura proposta de <i>hardware</i> e <i>software</i>	31
igura 4 – Representação das grandezas elétricas na rede analisada $\ \ldots \ \ldots \ \ldots$	32
igura 5 – Diagrama de blocos da metodologia	34
igura 6 – Função de pertinência, conforme a lógica $fuzzy$	36
igura 7 – Sensibilização dos sensores de corrente durante teste de falta	37
igura 8 – Diagrama de blocos da metodologia	43
igura 9 – Circuito exemplo $\ldots$	44
igura 10 – Sensibilização dos sensores de corrente durante teste de falta 	49
igura 11 – Intervalos do evento de falta	50
igura 12 – Fluxograma dos algoritmos evolutivos $\ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots$	57
igura 13 – Ilustração do processo de recombinação local	61
igura 14 – Funções de avaliação	62
igura 15 – Representação gráfica da função $F(x)$	63
igura 16 – Gerações do algoritmo de EE considerando a primeira condição inicial .	64
igura 17 – Gerações do algoritmo de EE considerando a segunda condição inicial .	64
igura 18 – Rede elétrica considerada para a aplicação $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$	66
igura 19 – Indivíduos ao longo das gerações	68
igura 20 – Diagrama da metodologia	69
igura 21 – Esquema de blocos de trechos $\ldots \ldots \ldots$	72
igura 22 – Processo de obtenção dos dados	74
igura 23 – Esquema da obtenção de dados para a Localização de Falta s $\ldots\ldots\ldots$	75
igura 24 – Defeito à jusante de chave de base fusível	76
igura 25 – Defeito à jusante de chave religadora $\ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots$	77
igura 26 – Exemplo de discretização dos trechos da área de busc a $\ .\ .\ .\ .\ .$	81
igura 27 – Esquema da estrutura de software para testes de faltas $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$	85
igura 28 – Ações para os testes de faltas	86

Figura 29 – Processo de inserção da falta em trecho
Figura 30 – Objeto para obtenção dos resultados dos testes de faltas $\ \ldots \ \ldots \ 87$
Figura 31 – Alimentador para aplicação dos testes de faltas $\ \ldots \ \ldots \ \ldots \ \ldots \ 90$
Figura 32 – Indicação dos equipamentos de monitoramento das Situações 1 e 2 91
Figura 33 – Posições de todas as faltas ABC simulados
Figura 34 – Localizações de faltas ABC com erros maiores que 1.000 m 94
Figura 35 – Posições de todos as faltas ABG simuladas
Figura 36 – Localizações de faltas ABG com erros maiores que 1.300 m 96
Figura 37 – Posições de todos as faltas AB simuladas
Figura 38 – Localizações de faltas AB com erros maiores que 1.200 m 98
Figura 39 – Localizações de faltas AG com erros maiores que 1.500 m 99
Figura 40 – Resultados para defeitos ABC, nas Situações 1 e 2 101
Figura 41 – Resultados de defeitos ABG, nas Situações 1 e 2
Figura 42 – Resultados para os defeitos AB, nas Situações 1 e 2 103
Figura 43 – Resultados para os defeitos AG, nas Situações 1 e 2 105
Figura 44 – Defeitos simulados na Situação 3 $\ \ldots \ \ldots$
Figura 45 – Resultados por tipo de defeito
Figura 46 – Descrição do estudo de caso 1 $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$ $114$
Figura 47 – Oscilografias de tensão e corrente do estudo de caso
Figura 48 – Dados de alarme do sensor que detectou curto-circuito
Figura 49 – Resultados de localização da falta
Figura 50 – Descrição do estudo de caso 2 $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$ $118$
Figura 51 – Oscilografias de tensão e corrente do estudo de caso
Figura 52 – Resultados de localização da falta
Figura 53 – Modelagem OpenDSS para transformador de tap central $\ . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ $
Figura 54 – Exemplo de controle do OpenDSS via Interface COM
Figura 55 – Visualização VBA dos objetos da Interface COM para o Open DSS 137

# Lista de tabelas

Tabela 1 –	Síntese dos trabalhos analisados
Tabela 2 –	Resultados da aplicação - primeira condição inicial $\ \ldots \ \ldots \ \ldots \ \ldots \ 63$
Tabela 3 $\ -$	Resultados da aplicação - segunda condição inicial $\ \ldots \ \ldots \ \ldots \ \ldots \ 65$
Tabela 4 $\ -$	Medições consideradas
Tabela 5 $$ –	Processo evolutivo - Gerações 1 e 2
Tabela 6 $\ -$	Processo evolutivo - Gerações 3, 4 e 5
Tabela 7 $$ –	Tipos de faltas
Tabela 8 –	Resultados para faltas ABC - Situação 1
Tabela 9 $\ -$	Resultados para faltas ABG - Situação 1
Tabela 10 –	Resultados faltas AB - Situação 1
Tabela 11 –	Resultados para faltas AG - Situação 1
Tabela 12 –	Resultados Situação 1
Tabela 13 –	Resultados para as faltas do tipo ABC - Situação 2 $\hdots$
Tabela 14 –	Resultados para as faltas do tipo ABG - Situação 2 $\hdots$
Tabela 15 –	Resultados para as faltas do tipo AB - Situação 2 $\hdots$
Tabela 16 –	Resultados para as faltas do tipo AG - Situação 2 $\hdots$
Tabela 17 –	Resultados Situação 2
Tabela 18 –	Resultados para as faltas do tipo ABC - Situação 2 $\hdots$
Tabela 19 –	Resultados para as faltas do tipo ABG - Situação 2 $\hdots$
Tabela 20 –	Resultados para as faltas do tipo AB - Situação 2 $\hdots$
Tabela 21 –	Resultados para defeitos AG - Situação 2
Tabela 22 –	Resultados Situação 3
Tabela 23 –	Resultados LF - Situação 1 - Áreas 1 e 2
Tabela 24 –	Resultados - Áreas 1 e 2 - Situação 1
Tabela 25 –	Resultados LF - Situação 2 - Áreas 1 e 2
Tabela 26 –	Resultados - Áreas 1 e 2 - Situação 2
Tabela 27 –	Resultados por Tipos de Defeito
Tabela 28 –	Resultados de localização para a Situação 2

Tabela 29 – Resultados de Localização para a Situação 3	112
Tabela 30 – Registro do evento de curto-circuito no SCADA	114
Tabela 31 – Registro do evento de curto-circuito no sistema de proteção $\ldots \ldots \ldots$	115
Tabela 32 – Resultados da Localização da Falta	116
Tabela 33 – Registro do evento de curto-circuito no sistema de proteção $\ .\ .\ .\ .$	119

# Lista de siglas

AMI Advanced Metering Infrastructure

**ASCII** American Standard Code for Information Interchange

- COD Centro de Operações da Distribuição
- DEC Duração Equivalente de Interrupções por Unidade Consumidora
- **DFR** Digital Fault Recorders
- **DTR** Digital Transient Recorders
- FEC Frequência Equivalente de Interrupções por Unidade Consumidora
- **GD** Geração Distribuída
- **GIS** Geographic Information System
- **IED** Intelligent Electronic Devices
- MDM Metering Data Management
- **PDS** Processador Digital de Sinais
- RMU Remote Monitoring Units
- SCADA Supervisory Control and Data Acquisition
- TC Transformador de Corrente
- **TFI** Temporary Fault Indicator
- **TP** Transformador de Potencial
- ${\bf UTR}\,$ Unidade Terminal Remota
- **VDFL** Voltage-Drop Fault Location

# Sumário

1	INTRODUÇÃO
1.1	Considerações Iniciais
1.2	Motivação e justificativa
1.3	Caracterização do problema de localização de faltas
1.4	Objetivos
1.5	Estrutura do documento
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA
2.1	Considerações iniciais
2.2	Técnicas tradicionais de Localização de Faltas
2.2.1	O trabalho de (TAKAGI et al., 1982) $\ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots 25$
2.2.2	O trabalho de (GIRGIS; FALLON, 1992)
2.2.3	O trabalho de (ZHU; LUBKEMAN; GIRGIS, 1997) 28
2.2.4	O trabalho de (SENGER et al., 2005) $\ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots 30$
2.2.5	O trabalho de (MANASSERO; SANTO; SOUTO, 2017)
<b>2.3</b>	Localização de Faltas com automação distribuída
2.3.1	O trabalho de (GALIJASEVIC; ABUR, 2002)
2.3.2	O trabalho de (TREMBLAY et al., 2007) $\ldots \ldots \ldots \ldots \ldots 37$
2.3.3	O trabalho de (ZVIETCOVICH; KAGAN, 2009)
2.3.4	O trabalho de (ZAVODA, 2010) $\ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots 40$
2.3.5	O trabalho de (PARKER; MCCOLLOUGH, 2011)
2.3.6	O trabalho de (MANASSERO; TAKEDA; FREITAS, 2014) 42
2.3.7	O trabalho de (TRINDADE et al., 2014)
2.3.8	O trabalho de (CORDOVA; FARUQUE, 2015)
2.3.9	O trabalho de (CAPELINI et al., 2016)
2.4	Análise de faltas em regime permanente
2.4.1	Correntes de defeito
2.4.2	Simulação de defeitos em regime permanente $\ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots 51$

2.4.3	Localização de Faltas em regime permanente	51
<b>2.5</b>	Considerações finais	52
2.5.1	Síntese dos trabalhos	52
2.5.2	Contribuições dos trabalhos	53
3	CONCEITOS DE COMPUTAÇÃO EVOLUTIVA PARA APLI-	
	CAÇÃO EM LOCALIZAÇÃO DE FALTAS	55
3.1	Considerações iniciais	55
<b>3.2</b>	Introdução	55
<b>3.3</b>	Algoritmos evolutivos	56
3.3.1	Princípios	56
3.3.2	Etapas do algoritmo evolutivo	56
3.3.3	Abordagens de Algoritmos Evolutivos	57
3.3.4	Estratégias Evolutivas	58
<b>3.4</b>	Exemplos ilustrativos	62
3.4.1	Determinação do máximo de uma função	62
3.4.2	Aplicação ao problema de Localização de Faltas	65
4	METODOLOGIA	69
4.1	Considerações iniciais	69
4.2	Entrada de dados para a Localização de Faltas	70
4.2.1	Integração de sistemas corporativos	70
4.2.2	Hipóteses e considerações	71
4.2.3	Obtenção dos dados	73
4.3	Determinação da área de busca	75
4.3.1	Definição dos blocos	75
4.3.2	Determinação da área de busca	75
4.4	Determinação das fases afetadas	78
4.4.1	Introdução	78
4.4.2	Hipóteses consideradas	78
4.4.3	Método para determinação das fases afetadas	78
4.5	Localização da falta	80
4.5.1	Estratégia Evolutiva para Localização de Faltas	80
4.5.2	Cálculo de curto-circuito para avaliação dos indivíduos	84
5	ESTUDOS DE CASOS E RESULTADOS	89
5.1	Considerações iniciais	89
5.2	Estudo aplicado a faltas simuladas	89
5.2.1	Procedimentos de teste	89
5.2.2	Rede elétrica analisada	90

5.2.3	Condições de testes
5.2.4	Configurações da Estratégia Evolutiva
5.2.5	Influência da quantidade de informações
5.2.6	Influência das ramificações
5.2.7	Influência do tipo de defeito
5.3	Estudo aplicado a defeito real 1
5.3.1	Descrição do caso
5.3.2	Entrada de dados $\ldots \ldots 113$
5.3.3	Resultados
5.3.4	Considerações $\ldots \ldots \ldots$
5.4	Estudo aplicado a defeito real 2
5.4.1	Descrição do caso
5.4.2	Entrada de dados $\ldots \ldots 118$
5.4.3	Resultados
5.4.4	Considerações
6	$CONCLUSÃO \dots 123$
6.1	Desafios para implantação em sistema real $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$ $123$
6.2	Adaptações para implantação em sistema real $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$ $124$
6.3	${\rm Medidores\ inteligentes\ .\ .\ .\ .\ .\ .\ .\ .\ .\ .\ .\ .\ .\$
6.4	Considerações finais
6.4.1	Trabalhos futuros
6.4.2	Publicações
REFEF	RÊNCIAS
APÊNI	DICE A OPENDSS 133

# Capítulo 1

# Introdução

### 1.1 Considerações iniciais

Em sistemas de distribuição de energia elétrica, o conceito de qualidade de energia é construído principalmente a partir de dois outros conceitos: qualidade do produto avaliada através de aspectos como níveis de tensão, variações de tensão e harmônicos - e qualidade do serviço, avaliada pelo registro de interrupções do fornecimento. Usualmente, os consumidores são mais frequentemente afetados e sensibilizados pela falta de energia.

Os problemas que afetam os sistemas de distribuição e que atuam piorando a qualidade de energia há muito vêm sendo enfrentados a partir de diversas frentes: incentivo ao uso de equipamentos mais eficientes, sinalização tarifária, controle de tensão e reativos, automatização de equipamentos, interoperabilidade de sistemas, dentre outras iniciativas.

No contexto exposto, este trabalho contribui com uma metodologia que busca a melhoria da qualidade do serviço, a partir de funcionalidades resultantes da automatização de equipamentos e interoperabilidade de sistemas.

### 1.2 Motivação e justificativa

No âmbito de automatização de equipamentos, diversas providências têm sido tomadas no sentido de inserir inteligência, processamento e armazenamento de dados e comunicação aos equipamentos de campo e aos sistemas das concessionárias. Empresas europeias (Enel Distribution, EDF e outras) (BORLASE, 2016) têm feito essas implementações principalmente com o intuito de gerenciar recursos distribuídos de energia.

Distribuidoras norte-americanas (PG&E, Xcel Energy e outras) assim têm agido com o objetivo de melhorar o aproveitamento de seus sistemas elétricos, reduzir o consumo no horário de pico, melhorar a confiabilidade da rede, dentre outros (BORLASE, 2016). No caso brasileiro, a intenção desses investimentos passa por melhorar os índices de continuidade do fornecimento de energia, reduzir perdas técnicas e não-técnicas e integrar fontes renováveis. Dentre as iniciativas citam-se o projeto Inovcity da EDP (medição inteligente, mobilidade elétrica e geração distribuída) (EDP (Energias de Portugal), 2017) e o Projeto Redes Inteligentes da AES Eletropaulo (medição inteligente e automação da distribuição) (AES-ELETROPAULO, 2017).

Os esforços nesse sentido tendem a levar mais inteligência e automatismos às redes elétricas, conforme preconiza o conceito de *Smart Grids* (ou Redes Elétricas Inteligentes) (BORLASE, 2016). Ele consiste em dotar de inteligência as redes elétricas convencionais, instalando equipamentos microprocessados, dotados de comunicação bidirecional de dados. Com isso, podem ser desenvolvidas lógicas locais ou centralizadas visando ao monitoramento, operação eficiente, otimização e planejamento dos sistemas de distribuição.

Uma das funcionalidades de *Smart Grids* é a localização de faltas com base em dados de diversos sistemas corporativos. Ela permite a determinação precisa da localização geográfica e elétrica do defeito. Com isso, as equipes de reparo são adequadamente preparadas e deslocadas para o atendimento da ocorrência, dirigindo-se diretamente para o local do defeito.

A expectativa é que a implantação dessa ferramenta possibilite a localização de defeitos com maior precisão e em intervalos de tempos menores. Com isso, espera-se reduzir os tempos de interrupção do fornecimento de energia, o desconforto imposto aos clientes e, portanto, o respeito aos limites da qualidade do serviço.

## 1.3 Caracterização do problema de localização de faltas

As redes elétricas são frequentemente afetadas por incidentes como: descargas atmosféricas, toque ou queda de árvores, rompimento de cabos, queda de postes, dentre outros. Nessas situações, os condutores ficam temporariamente ou permanentemente em curto-circuito, uma condição indesejada de funcionamento.

Como consequência do curto-circuito, os sistemas de proteção entram em atuação, desligando blocos do alimentador e afetando o fornecimento de energia a um grande número de clientes. Isso pode acarretar desconforto, perdas financeiras e materiais.

Índices de qualidade de serviço são estabelecidos para quantificar o problema de interrupção do fornecimento de energia. Dentre eles, podem-se citar o Duração Equivalente de Interrupções por Unidade Consumidora (DEC) e o Frequência Equivalente de Interrupções por Unidade Consumidora (FEC). A busca de melhor avaliação da qualidade de serviço, pela distribuidora, passa por reduzir o tempo e a frequência de interrupção do fornecimento.

Uma providência para reduzir o tempo de interrupção é desenvolver mecanismos de localização geográfica do ponto onde ocorreu o curto-circuito. Conhecido o local do defeito, as equipes de reparo podem ser despachadas diretamente para esse lugar. Como consequência, o fornecimento de energia pode ser restabelecido mais rapidamente.

### 1.4 Objetivos

Este trabalho visa ao desenvolvimento de uma metodologia de localização de faltas em redes elétricas de distribuição, com base em diversos tipos de informação. Dentre eles, pode-se citar: medições de grandezas elétricas antes e durante o defeito, estado de operação de chaves, alarmes de falta de tensão e detecção de curto-circuito.

Com isso, pretende-se propor uma utilização de informações, geradas pelos diversos equipamentos e sistemas de automação avançada da distribuição, para localização de faltas.

### 1.5 Estrutura do documento

O capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica sobre os principais trabalhos que propõem metodologias de localização de faltas em sistemas elétricos. Em seguida, o capítulo 3 introduz o conceito de algoritmos evolutivos, detalhando como o algoritmo será implementado neste trabalho. No capítulo 4, descreve-se a metodologia proposta, seguida do capítulo 5 que é destinado aos resultados de simulações e estudos de caso. Por fim, o capítulo 6 contém discussões finais acerca dos resultados obtidos e sugere trabalhos futuros abordando o tema deste trabalho.

# Capítulo 2

# Revisão bibliográfica

### 2.1 Considerações iniciais

Conforme apresentado no capítulo introdutório, este trabalho aborda localização de faltas em redes de distribuição. Este capítulo discute um conjunto de trabalhos acerca desse tema, sendo divididos em: abordagem tradicional e com automação distribuída. Também são apresentados trabalhos que analisam eventos de curto-circuito no domínio da frequência.

### 2.2 Técnicas tradicionais de Localização de Faltas

#### 2.2.1 O trabalho de (TAKAGI et al., 1982)

O trabalho de (TAKAGI et al., 1982) sugere uma metodologia de localização de faltas para linhas de transmissão, com base em medições fasoriais em um dos terminais da linha.

#### 2.2.1.1 Requisitos de dados

A metodologia proposta pelos autores depende de medições fasoriais de tensões e correntes obtidas por um relé de proteção em um dos terminais da linha de transmissão. É necessário obter os fasores dessas grandezas elétricas em dois instantes: antes da falta e imediatamente após o início da falta. A metodologia também depende da impedância da linha por unidade de comprimento.

#### 2.2.1.2 Cálculo da distância de falta

Seja o circuito monofásico da Figura 1, representando uma linha de transmissão, seus terminais S e R, o sistema LFD (Localizador de Faltas Digital), a impedância da linha  $\bar{z}$  por unidade de comprimento e a resistência de falta  $R_F$  no ponto da falta.

Durante a falta, determina-se a tensão  $\dot{V}_S$  a partir da Equação 1, onde  $\dot{I}_S$  é a corrente de falta medida no terminal S e  $\dot{I}_F$  é a corrente que percorre a resistência de falta.

$$\dot{V}_S = x \cdot \bar{z} \cdot \dot{I}_S + R_F \cdot \dot{I}_F \tag{1}$$

Seja  $\dot{I}''_{S}$  a corrente de falta de sobreposição, definida conforme a Equação 2, em que  $\dot{I}_{pre}$  é a corrente pré-falta medida no terminal S.

$$\dot{I}_{S}^{''} = \dot{I}_{S} - \dot{I}_{pre} \tag{2}$$

Multiplicando os dois lados da Equação 1 pelo conjugado de  $\dot{I}_{S}^{''*}$ , e considerando a parte imaginária, obtém-se a Equação 3.

$$\operatorname{Im}(\dot{V}_S \cdot \dot{I}_S^{''*}) = x \cdot \operatorname{Im}(\bar{z} \cdot \dot{I}_S \cdot \dot{I}_S^{''*}) + R_F \cdot \operatorname{Im}(\dot{I}_F \cdot \dot{I}_S^{''*})$$
(3)

O ponto-chave desse trabalho reside na hipótese de que  $\dot{I}_{S}^{"*}$  e  $\dot{I}_{F}$  estão em fase. Assumindo essa hipótese, tem-se que  $\text{Im}(\dot{I}_{F} \cdot \dot{I}_{S}^{"*}) = 0$ . Então, a distância de falta x é calculada conforme a Equação 4.

$$x = \frac{\operatorname{Im}(\vec{V}_S \cdot \vec{I}_S^{\prime\prime*})}{\operatorname{Im}(\bar{z} \cdot \vec{I}_S \cdot \vec{I}_S^{\prime\prime*})} \tag{4}$$



Figura 1 – Cálculo da distância de falta Fonte: (TAKAGI et al., 1982) (adaptado)

Essa formulação matemática para o cálculo da distância de falta permite superar algumas limitações da funcionalidade de localização de faltas disponível nos relés de proteção. Dentre elas, citam-se: influências das cargas, da resistência de falta e das correntes induzidas por impedâncias mútuas (TAKAGI et al., 1982).

#### 2.2.1.3 Considerações

Esse trabalho propõe uma metodologia de localização de faltas que demanda poucos dados de entrada, a partir de um único equipamento de medição. Se, por um lado,

poucos dados de entrada são utilizados, diversas hipóteses simplificadoras são adotadas para superar o efeito das cargas, a influência da resistência de falta e o efeito das correntes induzidas por impedâncias mútuas.

Uma dessas hipóteses é de que a corrente  $\dot{I}_{S}^{"*}$  medida no terminal S está em fase com a corrente  $\dot{I}_{F}$ , que percorre a resistência de falta. Caso haja uma defasagem não desprezível entre essas correntes, a precisão da metodologia é comprometida.

Apesar de ser robusta e de fácil implementação em equipamentos de proteção, a metodologia é limitada aos sistemas de transmissão. Se aplicada ao problema de localização de faltas em sistemas de distribuição, a metodologia forneceria múltiplas soluções ao longo da rede devido às ramificações.

Ademais, o desconhecimento da topologia da rede impede a descrição georreferenciada das possíveis soluções, já que a distância de falta é a única informação fornecida pela metodologia.

#### 2.2.2 O trabalho de (GIRGIS; FALLON, 1992)

O trabalho de (GIRGIS; FALLON, 1992) propõe uma metodologia de localização de faltas em linhas de transmissão, baseada no cálculo de impedância. A abordagem pressupõe a disponibilidade de equipamentos de medição em uma extremidade ou em ambas as extremidades da linha de transmissão. Também pressupõe que a linha é totalmente transposta e emprega o conceito de componentes simétricas.

#### 2.2.2.1 Requisitos de dados

A metodologia desse trabalho se baseia na disponibilidade de equipamentos *Digital Fault Recorders* (DFR), que registram oscilografias de tensão e corrente em uma das extremidades da linha. Eles são utilizados principalmente em linhas que desempenham papel importante no sistema de transmissão. Os autores indicam aplicações em linhas de 69 e 115 kV.

Como os registros gerados pelos DFRs têm formato binário, os autores propuseram uma rotina computacional que convertesse os registros para o formato American Standard Code for Information Interchange (ASCII). Já no formato ASCII, os registros devem alimentar as rotinas de localização de faltas, escritas em FORTRAN ou C.

#### 2.2.2.2 Cálculo da distância de falta

A ideia central é percorrer os trechos da linha iterativamente, calculando a distância de falta em cada iteração. Um valor de distância maior que o comprimento do trecho investigado significa que se deve passar para a iteração seguinte, para investigar um trecho posterior. Entre uma iteração e outra, os valores de tensão e corrente são atualizados, considerando quedas de tensão e injeções de corrente.

#### 2.2.2.3 Considerações

A metodologia proposta significou um avanço na localização de faltas em linhas de transmissão. As equipes de manutenção, que dependiam da investigação presencial de indicadores de falta para localizar defeitos, passaram a ter a localização precisa do ponto de falta. Esse avanço foi possível graças a equipamentos de medição, conhecimento de parâmetros das linhas e rotinas digitais de cálculo determinístico.

Embora represente um avanço na localização de faltas, esse trabalho se restringe às linhas de transmissão. O conceito deve enfrentar problemas ao ser transferido para a distribuição, onde as linhas não são transpostas, os ramais são bastante ramificados e não-homogêneos.

Por fim, um complicador mais atual é o emprego de geração distribuída. A forma como a metodologia foi formulada não considera contribuições de correntes de unidades de geração. Ainda que a formulação incluísse geração distribuída, suas medições deveriam ser consideradas como uma das fontes de dados para os algoritmos.

#### 2.2.3 O trabalho de (ZHU; LUBKEMAN; GIRGIS, 1997)

A metodologia de (ZHU; LUBKEMAN; GIRGIS, 1997) propõe a localização de defeitos em sistemas de distribuição. O método se baseia no registro das formas de onda de tensão e de corrente, no início do alimentador, durante a falta. Devido à grande ramificação característica dos sistemas de distribuição, o resultado do algoritmo é um conjunto de possíveis trechos com defeito. Um algoritmo de refinamento indica o trecho mais provável de defeito.

#### 2.2.3.1 Requisitos de dados

O método se utiliza de equipamentos *Digital Transient Recorders* (DTR) que, através de transformadores de corrente e de potencial, capturam as formas de onda de tensão e de corrente no início do alimentador, conforme ilustra a Figura 2.



Figura 2 – Esquema da captura de dados Fonte: (ZHU; LUBKEMAN; GIRGIS, 1997)

Além das formas de onda das grandezas medidas, o método depende do conhecimento dos parâmetros elétricos, da topologia da rede e de suas conectividades.

#### 2.2.3.2 Método Proposto

Após a captura das formas de onda, uma rotina faz a estimação dos fasores de tensão e corrente do intervalo de falta. Com eles, o método extrai a sequência dos eventos da falta e, por fim, a classificação do tipo de falta.

Em seguida, é executado o algoritmo de localização efetivamente. Iterativamente, investigam-se os trechos do sistema, calculando a distância de falta através da Equação 5, em que D é a variável a ser determinada.

$$\begin{bmatrix} \dot{V}'_{a} \\ \dot{V}'_{b} \\ \dot{V}'_{c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{V}_{a} \\ \dot{V}_{b} \\ \dot{V}_{c} \end{bmatrix} - D \begin{bmatrix} \bar{z}_{aa} & \bar{z}_{ab} & \bar{z}_{ac} \\ \bar{z}_{ba} & \bar{z}_{bb} & \bar{z}_{bc} \\ \bar{z}_{ca} & \bar{z}_{cb} & \bar{z}_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{a} \\ \dot{I}_{b} \\ \dot{I}_{c} \end{bmatrix}$$
(5)

em que

$\dot{V}_a,  \dot{V}_b,  \dot{V}_c$	fasores das tensões no início do trecho;
$\dot{V}'_a,  \dot{V}'_b,  \dot{V}'_c$	fasores das tensões no final do trecho;
$\dot{I}_a,  \dot{I}_b,  \dot{I}_c$	fasores das correntes do trecho;
$\bar{z}_{ii}$	impedâncias próprias do trecho, em $\Omega/km;$
$\bar{z}_{ij}$	impedâncias mútuas do trecho, em $\Omega/km;$
D	distância de falta calculada;

O método guarda como possível local de defeito os trechos para os quais a distância de falta calculada resultar menor que o comprimento do trecho. Entre duas iterações, os fasores de tensão e corrente são atualizados, considerando as quedas de tensão nos trechos e as injeções de corrente nas cargas e nos ramais.

As correntes das cargas durante o defeito são calculadas mediante expressão da Equação 6. Nessa expressão,  $I_r \in I_i$  são as partes real e imaginária, respectivamente, da corrente em tensão nominal  $V_0$ . Os coeficientes  $n_p \in n_q$  caracterizam o tipo de carga.

$$I = I_r \left| \frac{V}{V_0} \right|^{n_p - 2} + j I_i \left| \frac{V}{V_0} \right|^{n_q - 2}$$
(6)

Por fim, tem-se um conjunto de prováveis locais de defeito. Para refinar a busca pelo local da falta, aplica-se metodologia que examina a rejeição de carga, a partir da análise do sistema pré e pós-falta. Nessa análise, os carregamentos da condição pré-falta são comparados com os da condição pós-falta, o que permite identificar as cargas que foram desligadas.

#### 2.2.3.3 Considerações

Aspectos importantes dessa metodologia podem ser ressaltados em relação aos algoritmos desenvolvidos para localização de faltas na transmissão. Primeiramente, as análises dos trechos são feitas com base em componentes de fase, considerando mútuas. Isso considera o fato de que os alimentadores primários não são transpostos. Depois, esse método traz melhoria no modelo de cargas, que passam a ser representadas por admitância cujo valor é função da tensão.

Os resultados dos testes dessa metodologia mostram que as considerações e hipóteses adotadas são satisfatórias. Dentre as hipóteses, destacam-se os cálculos de distância com base nos fasores (componentes fundamentais) de tensão e corrente no início do alimentador.

Os autores não forneceram detalhes da implementação dos cálculos para outros tipos de falta. Faltas menos severas e também aquelas mais distantes podem dificultar a etapa de diagnóstico, em que se estima a variação de carga vista pela SE.

#### 2.2.4 O trabalho de (SENGER et al., 2005)

Em (SENGER et al., 2005), os autores abordam localização de faltas em sistemas de distribuição, propondo não somente o algoritmo de localização do ponto da falta, mas também uma arquitetura lógica dos módulos de *software* que compõem o sistema de localização. O método se baseia no cálculo dos fasores de tensão e corrente no início do alimentador, a partir de oscilografias dessas grandezas no instante da falta.

Os autores propõem o envio de dados pré-formatados dos equipamentos de campo para um centro de operações e execução dos algoritmos. Uma estrutura modular de componentes de *software* facilitam a manutenção e futuros desenvolvimentos.

#### 2.2.4.1 Requisitos de dados

O método propõe a utilização de dispositivos *Intelligent Electronic Devices* (IED) para monitorar os sinais de tensão e corrente de cada alimentador de uma subestação. Assim que eventos de sobrecorrente são detectados, esses equipamentos registram oscilografias de tensões e correntes e as enviam para um computador na subestação.

Esse computador, por sua vez, envia informações pré-formatadas para o Centro de Operações da Distribuição (COD), via linha dedicada, *dial-up* ou *link* de rádio. O esquema da Figura 3 representa com detalhes a estrutura proposta de *hardware* e *software*, com os respectivos fluxos de dados. Nessa , o "Módulo PDS" representa o Processamento Digital de Sinais, o "Módulo COM" realiza o gerenciamento de comunicação na subestação e no COD e o "Módulo LF" contempla a Localização de Faltas efetivamente.



Figura 3 – Estrutura proposta de *hardware* e *software* Fonte: (SENGER et al., 2005)

Além dos dados de medição dos fasores, o método exige o conhecimento dos parâmetros da rede, que envolvem dados de conectividade elétrica, parâmetros dos equipamentos e dados dos consumidores.

#### 2.2.4.2 O algoritmo de Localização de Faltas

Os autores desse trabalho sugerem uma metodologia de vários passos para a determinação da distância de falta. Primeiramente, deve-se estimar as potências das cargas, a partir da medição de potência total no início do alimentador na condição pré-falta.

Um fluxo de potência inicial deve determinar as tensões e correntes da condição préfalta. Os autores propõem cálculo não-matricial do fluxo de potência, para melhorar o desempenho do sistema.

Iterativamente, a expressão da Equação 7 é aplicada para cada trecho do alimentador. Ela relaciona as tensões no início do trecho, as correntes no trecho analisado, as correntes de falta e a distância D do defeito. Todas as grandezas envolvidas no cálculo são relativas ao instante do curto-circuito. O trecho analisado é descartado caso a distância calculada supere o comprimento do trecho.

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_a^p \\ \dot{V}_b^p \\ \dot{V}_c^p \end{bmatrix} = D \begin{bmatrix} \bar{z}_{aa} & \bar{z}_{ab} & \bar{z}_{ac} \\ \bar{z}_{ba} & \bar{z}_{bb} & \bar{z}_{bc} \\ \bar{z}_{ca} & \bar{z}_{cb} & \bar{z}_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_a^{pq} \\ \dot{I}_b^{pq} \\ \dot{I}_c^{pq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_a^f & R_f & R_f \\ R_f & R_b^f & R_f \\ R_f & R_f & R_c^f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_a^f \\ \dot{I}_b^f \\ \dot{I}_c^f \end{bmatrix}$$
(7)

Nessa expressão,  $\begin{bmatrix} \dot{V}_a^p & \dot{V}_b^p & \dot{V}_c^p \end{bmatrix}^T$  são os fasores de tensões no início do trecho analisado. D é a distância de falta calculada,  $\bar{z}_{ii}$  e  $\bar{z}_{ij}$  são as impedâncias próprias e mútuas dos trechos, respectivamente, em  $\Omega/km$ .  $\begin{bmatrix} \dot{I}_a^{pq} & \dot{I}_c^{pq} \end{bmatrix}^T$  são as correntes nas fases do trecho e  $R_a^f$ ,  $R_b^f$ ,  $R_c^f$  e  $R^f$  são as resistências do ponto do defeito, conforme ilustra a Figura 4.



Figura 4 – Representação das grandezas elétricas na rede analisada Fonte: (SENGER et al., 2005)

Devido à característica de ramificação dos sistemas de distribuição, é possível que o algoritmo retorne um conjunto de possíveis trechos de defeito. Um procedimento de refinamento analisa as condições pós-falta para determinar a rejeição de carga e eliminar possibilidades de localização.

#### 2.2.4.3 Considerações

À época da publicação desse trabalho, o sistema proposto significou grande avanço para a localização de defeitos em redes de distribuição. A estrutura modular de *hardware* e *software* é fundamental para depuração dos algoritmos, melhorias nos processos e facilidade de manutenção, sem alterar os demais módulos. A abordagem matemática detalhada, com ajuste das potências das cargas, permite representação precisa do sistema no instante da falta.

Algumas ressalvas podem ser feitas em relação à metodologia para aplicação nos sistemas atuais. A formulação proposta considera que a corrente de defeito tem a subestação como única fonte. Isso impede considerar as contribuições de unidades de geração distribuída para a falta.

O funcionamento desse sistema de forma não integrada aos demais sistemas corporativos dificulta a atualização da topologia da rede, bem como dos estados das chaves. Dado que esses parâmetros podem ser alterados diariamente, a precisão do algoritmo de localização de faltas pode ser afetada.

#### 2.2.5 O trabalho de (MANASSERO; SANTO; SOUTO, 2017)

Esse trabalho apresenta uma metodologia de localização de faltas em redes de distribuição, a partir da estimação dos fasores de tensão, na saída do alimentador, após o início do curto-circuito. Um método de otimização é implementado para estimar a distância da falta e a matriz de admitâncias nodais da falta.

#### 2.2.5.1 Requisitos de dados

Os insumos necessários são: topologia e parâmetros elétricos do alimentador (provenientes do banco de dados da concessionária), medições fasoriais de tensão e corrente pré-falta e de tensão após o início da falta, medidas pelo relé de proteção instalado no início do alimentador. As medições de tensão são aquisitadas, processadas e os respectivos fasores são estimados.

#### 2.2.5.2 Metodologia proposta

A metodologia proposta pelos autores se baseia na análise de curto-circuito em todos os trechos de um alimentador. Para cada trecho investigado, é executado um algoritmo de otimização para minimizar o erro entre os valores medidos e calculados das tensões pós-falta na saída do alimentador. Nesse processo, os parâmetros envolvidos são a posição da falta e a matriz de admitâncias nodais da falta. O fluxograma da Figura 5 ilustra as etapas da localização de faltas.

O método *Pattern Search*, ou Pesquisa de Padrões, é empregado para resolver o problema de otimização. Ele se baseia na geração de um conjunto de combinações dos parâmetros de entrada, cujos resultados são comparados com o resultado inicial. Esse conjunto de combinação é reduzido iterativamente, até que se encontre o valor ótimo.

#### 2.2.5.3 Considerações

Esse trabalho contribui com a ideia de localizar faltas com base na comparação entre grandezas elétricas calculadas e suas respectivas medições, supondo faltas em diversos pontos da rede e com diferentes características. A abordagem de otimização é uma ferramenta que permite a estimação, com boa precisão, de diversas incógnitas (a posição e as características da falta).

A metodologia do trabalho pode ter seus resultados prejudicados em situações em que as condições de operação são diferentes daquelas previstas. Elas podem ser causadas por manobra de chaves telecomandadas, abertura de chaves sem telecomando por equipes



Figura 5 – Diagrama de blocos da metodologia Fonte: (MANASSERO; SANTO; SOUTO, 2017)

de manutenção. De modo geral, o módulo de localização de faltas pode ter uma modelagem inconsistente devido à não integração em tempo real com os demais sistemas da concessionária.

### 2.3 Localização de Faltas com automação distribuída

O conceito de Automação Distribuída tem se concretizado nos sistemas de distribuição através da implantação de equipamentos inteligentes para controle, monitoramento e supervisão. Dentre eles, citam-se: relés de chaves de proteção, controladores de reguladores de tensão e de bancos de capacitores e sensores de corrente. Esses equipamentos registram grande quantidade de dados, que são enviados ao Centro de Operações da Distribuição. Nesse local, os sistemas corporativos específicos da empresa distribuidora recebe, processa e armazena esses dados.

A inserção de equipamentos inteligentes ao longo dos alimentadores permite uma forma atual de localização de faltas: a utilização de medições de corrente e tensão em chaves monitoradas, detecção de corrente de curto-circuito por sensores de corrente, modelos
digitais dos alimentadores primários, dados históricos e algoritmos computacionais.

## 2.3.1 O trabalho de (GALIJASEVIC; ABUR, 2002)

Esse trabalho apresenta metodologia para localização de faltas com base em afundamentos de tensão. Embora destinada a sistemas de transmissão, a abordagem pode ser transportada a sistemas de distribuição. São consideradas medições de tensão em alguns nós do sistema, durante o evento do curto-circuito. Os autores lançam mão da lógica *fuzzy* para tratar do problema dos erros de medição.

## 2.3.1.1 O algoritmo

Diversas situações em sistemas de potência podem levar ao problema de afundamentos de tensão, notadamente partida de cargas pesadas e curto-circuitos. Quanto maior a proximidade do ponto do defeito, maiores os afundamentos de tensão percebidos. Essa ideia pode ser analisada pelo conceito de áreas de vulnerabilidade. Para cada nó analisado, são feitas simulações aplicando-se curto-circuito nos demais nós da rede. São identificadas as áreas para as quais os afundamentos de tensão resultam em tensões residuais de 10 %, 20 %, ..., do valor nominal, em torno do nó analisado.

A partir da matriz de impedâncias nodais de uma rede para cálculo de curto-circuito, supondo um defeito em um nó k, pode-se calcular a tensão em um nó i em função das impedâncias  $Z_{ik}$  e  $Z_{kk}$ . Então, pode-se gerar um conjunto de dados off-line dos perfis de tensão ao longo do sistema para defeitos afetando cada nó, considerando os diferentes tipos de defeito. Quando da ocorrência de um defeito efetivamente, são calculados os índices de erro  $\delta_{i,k}$ . Eles fornecem o desvio da tensão calculada em uma barra i, em relação ao valor medido, para um defeito em uma barra k, conforme a Equação 8.

$$\delta_{i,k} = \left| V_{i,k}^{calc} \right| - \left| V_i^{meas} \right| \tag{8}$$

Aceita-se como local do defeito a barra k que produzir o menor índice de erro. Para a determinação da Resistência de Falta  $(R_f)$ , o conjunto de dados deve ser estendido. Os contornos de vulnerabilidade são gerados para cada combinação (Localização x  $R_f$ ). A solução do problema é um par (Localização x  $R_f$ ), que deve ser obtido como sendo o de menor desvio em relação às medições.

Os autores consideraram a lógica *fuzzy* ao assumir que todos os nós da rede podem pertencer ao conjunto solução. Porém, o grau de pertinência  $\mu$  a esse conjunto varia em função do desvio  $\delta$ , conforme uma função como a da Figura 6.

#### 2.3.1.2 Requisitos de dados

O método necessita um conhecimento prévio dos contornos de vulnerabilidade para cada nó a ser considerado. Essa informação pode ser obtida de modo *off-line* e armazenada



Figura 6 – Função de pertinência, conforme a lógica *fuzzy* Fonte: (GALIJASEVIC; ABUR, 2002)

em banco de dados. Nota-se a necessidade de grande disponibilidade de armazenamento, dado que diversas combinações de situações devem ser consideradas, envolvendo resistência de falta, tipo de defeito e nó analisado.

Os autores pressupõem a utilização de estrutura pré-existente de medição das formas de onda das tensões durante o curto-circuito. Pressupõem, portanto, que a infraestrutura de comunicação de dados esteja funcional e disponível o tempo todo. No caso de redes de distribuição, o monitoramento é feito, em geral, apenas na subestação. Assim, é necessário a implantação de monitores (como medidores de qualidade) ao longo dos alimentadores, que devem ser assistidos por uma infraestrutura funcional e disponível de transporte de dados.

## 2.3.1.3 Ressalvas

O trabalho não entra no mérito da implementação prática do sistema de aquisição de medições, assumindo que o sistema já dispõe de um conjunto de medidores associados a uma infraestrutura de comunicação funcional. Essa preocupação justifica-se quando se procura estender este método aos sistemas de distribuição, que não possuem monitoramento de tensão ao longo dos alimentadores. Devem ser discutidos aspectos como: alocação dos monitores, nível de precisão das medições e disponibilidade do canal de comunicação.

## 2.3.1.4 Contribuições

Esse trabalho indica um novo caminho para a localização de defeitos: o monitoramento de tensão ao longo do sistema elétrico, associado a um modelo da rede elétrica e cálculos computacionais como apoio. Apesar de ser destinado a sistemas de transmissão, o conceito de detecção dos afundamentos de tensão pode ser aplicado às redes de distribuição.

O algoritmo de localização do defeito e estimação da resistência de falta gira em torno de monitores distribuídos, transmissão de dados em tempo real, processamento de sinais de

tensão e modelagem computacional do sistema. Nota-se a necessidade de integração entre equipamentos de campo, comunicação de dados, intercâmbio de informação entre sistemas e processamento em tempo real. Esses requisitos tendem a ser plenamente atendidos no contexto de Redes Elétricas Inteligentes.

## 2.3.2 O trabalho de (TREMBLAY et al., 2007)

Esse trabalho trata do problema de localização de faltas a partir de uma ferramenta recente e inovadora: monitoramento de tensão em pontos ao longo do alimentador. Parte do pressuposto de que o afundamento de tensão é maior à medida que se aproxima do local do defeito.

## 2.3.2.1 Medidores de qualidade

Os medidores de qualidade *Remote Monitoring Units* (RMU) foram inicialmente empregados para prever falha de equipamentos. Eles surgem como nova ferramenta para a localização de faltas, dando origem à técnica *Voltage-Drop Fault Location* (VDFL), que se baseia nos afundamentos de tensão registrados pelos RMUs, durante a falta, para a localização do defeito. Essa técnica permite superar as barreiras para os algoritmos tradicionais (desconhecimento da resistência de falta, ramificação da rede, desequilíbrio de fase, etc), além de fornecer outras informações: nível de corrente de curto-circuito, tensão de arco, duração da falta, subsidiando também a identificação da causa do defeito. Os autores desse trabalho mencionam que poucos dispositivos RMUs são necessários para localizar faltas adequadamente.

#### 2.3.2.2 Visão geral da técnica VDFL

A VDFL requer pelo menos 3 monitores RMU posicionados no alimentador, conforme o exemplo da Figura 7, geralmente associado a um consumidor - como medidor de energia, por exemplo. São mencionados conversores AD de 4 kHz de 8 bits.



Figura 7 – Sensibilização dos sensores de corrente durante teste de falta Fonte: (TREMBLAY et al., 2007)

Quando da ocorrência de uma falta, as formas de onda associadas ao afundamento da tensão são armazenadas em banco de dados dedicado. Uma aplicação computacional obtém as medições de afundamentos de tensão e as associa a um modelo de rede. Um algoritmo iterativo determina o local da falta a partir de sincronizações, aproximações e correções de erro. Esse processo fica mais complicado à medida que se aumenta a complexidade do alimentador.

## 2.3.2.3 Ressalvas

Para que efetivamente sejam utilizadas as medições de afundamentos de tensão, é necessário que haja uma estrutura de comunicação disponível, para a transmissão, em alguns minutos, das grandezas associadas ao evento de curto-circuito. Não raro, as infraestruturas de comunicação no Brasil sofrem de congestionamento de dados, baixa disponibilidade e ineficiência (NEVES; BAGAROLLI, 2013).

## 2.3.2.4 Contribuições

O trabalho trata do problema de localização de faltas a partir de uma ferramenta recente e inovadora: monitoramento de tensão em pontos ao longo do alimentador. Parte do pressuposto de que o afundamento de tensão é maior à medida que se aproxima do local do defeito.

A implantação dessa técnica pode se valer de infraestrutura de *Advanced Metering Infrastructure* (AMI) existente, desde que os medidores inteligentes considerados tenham a funcionalidade de medição de afundamentos de tensão.

A técnica de VDFL pode ser utilizada em combinação com outras técnicas, como aquela baseada em sensores de corrente ao longo do alimentador. Desta forma, as limitações de uma metodologia podem ser compensadas pelas virtudes de outra.

## 2.3.3 O trabalho de (ZVIETCOVICH; KAGAN, 2009)

Os autores desse trabalho propõem metodologia baseada em algoritmos evolutivos para localização de faltas e estimar os afundamentos de tensão durante esses eventos. Embora tenha se destinado a sistemas de transmissão, a metodologia pode ser aplicada às redes de distribuição, fazendo algumas adaptações.

## 2.3.3.1 Hipóteses

A metodologia proposta depende de um modelo digital do sistema elétrico investigado, contendo a topologia elétrica, modelo de transformadores, modelo de cargas e outros equipamentos. Os autores pressupõem a existência de equipamentos de monitoramento ao longo do sistema, tais como medidores de qualidade. Eles fornecem medições precisas de tensão e corrente em pontos do circuito. Ressalta-se que esses medidores previamente instalados na rede não são originalmente alocados com a finalidade de localização de faltas.

## 2.3.3.2 A metodologia

Os autores propuseram metodologia baseada em testes de eventos de curto-circuito. Em um determinado teste, adotam-se uma resistência de defeito, um tipo de falta e um ponto do alimentador. O defeito é simulado a partir de *software* simulador de redes e as medições de campo são comparadas com as tensões e correntes calculadas para o defeito teste, gerando um índice de erro. Assume-se como solução do problema o teste que gerar o menor índice de erro.

O procedimento de testes de defeitos é implementado a partir de um algoritmo evolutivo, denominado Estratégia Evolutiva. Segundo ele, indivíduos - que representam um teste em particular - iniciam um processo evolutivo. Aqueles mais bem adaptados têm maior probabilidade de pertencer à geração seguinte. Nesse processo, a avaliação de adaptabilidade de um determinado indivíduo constitui o cálculo do seu índice de erro. Assim, os "melhores" indivíduos têm os menores índices de erro. Ou seja, representam melhor a solução do problema.

## 2.3.3.3 Ressalvas

Pode-se apontar como ressalva a aplicação das hipóteses desse trabalho às redes de distribuição. Pode-se encontrar restrições de monitoramento dessas redes, que em geral possuem medição apenas na saída do alimentador.

Dado que a metodologia proposta pelos autores se baseia em um modelo digital da rede elétrica, é possível que sua topologia esteja desatualizada com relação a estados de chaves da rede. Desvios de representação como esse podem levar a erros de localização de faltas.

#### 2.3.3.4 Contribuições

Esse trabalho representa importante contribuição para o problema de localização de faltas. Um primeiro aspecto é a proposição de testes de defeitos, levando à comparação entre medições e valores calculados. Isso confere valor aos equipamentos de monitoramento da rede, que passam a ser demandados a partir de uma finalidade diferente daquele para que foram instalados.

Um segundo aspecto de contribuição se dá pelo emprego de algoritmo evolutivo para localização precisa do ponto do defeito. Nota-se também que esse algoritmo permite a determinação de outros parâmetros, como a resistência de falta. Com esse algoritmo, a busca por defeitos não se restringe às barras (nós) do alimentador nem depende do uso de expressão para cálculo determinístico da distância da falta. Isso é fundamental para superar o problema de múltiplas soluções devido às ramificações dos circuitos.

## 2.3.4 O trabalho de (ZAVODA, 2010)

O trabalho trata da iniciativa do instituto *Hydro-Québec* de melhorar os índices de qualidade de energia do seus sistemas elétricos, caminhando rumo às Redes Elétricas Inteligentes. O autor trata de dois objetivos: eficiência energética (redução de perdas e melhoria dos níveis de tensão) e localização de faltas (redução dos tempos de interrupção). Aplicações como controle *Volt-Var* e *Self-Healing* têm permitido a redução de perdas, auto-reconção mediante defeitos elétricos, maior eficiência na distribuição de energia e redução dos tempos de interrupção do fornecimento.

## 2.3.4.1 O algoritmo

O autor propõe metodologia de localização de faltas que se baseia em alguns algoritmos: determinação da impedância de defeito vista pela subestação e restrição da zona de busca por VDFL (*Voltage-Drop Fault Location*) - técnica de triangularização dos afundamentos de tensão, utilizando medições de monitores de qualidade de energia.

Três medidores inteligentes capazes de armazenar a forma de onda da tensão durante o defeito são selecionados estrategicamente em pontos do alimentador. O algoritmo de localização recebe essas formas de onda e as sincroniza para que então seja identificado o local do defeito.

## 2.3.4.2 Requisitos de dados

A funcionalidade de localização de faltas necessita de um conjunto de formas de onda de tensão, geradas pelos monitores ao longo do alimentador. Como exemplo de monitores, o autor cita medidores trifásicos ION7700 e ION8600. Testes mostraram que a localização de falta tem resultado considerado preciso quando as medições são feitas com taxa de amostragem maior ou igual a 32 amostras por ciclo.

Para execução dos algoritmos de localização do defeito, as medições obtidas dos equipamentos de campo devem ser interpretadas segundo um modelo computacional da rede. É necessário conhecer a sua topologia, as suas conectividades e a localização dos equipamentos que fizeram as medições. Um sistema GIS contém o modelo de rede georreferenciado. Um sistema com o cadastro dos consumidores e um sistema de gerenciamento de dados de medição subsidiam os parâmetros das cargas.

## 2.3.4.3 Ressalvas

O trabalho não apresenta detalhes sobre o tratamento dos sinais de afundamento de tensão. Não é descrito o algoritmo de identificação da área mais provável de defeito a

partir das medições. Seria de grande importância conhecer a técnica de triangularização dos fasores das tensões de afundamento.

A seleção sem critério de quaisquer três medidores de energia pode não levar aos resultados esperados. Assim, entende-se que é necessária uma etapa prévia de alocação ótima dos medidores de qualidade.

Conforme o autor menciona, a precisão das medições feitas pelos medidores de qualidade pode afetar os algoritmos de localização de faltas. Assim, é necessário se fazer um estudo de sensibilidade da localização em função dos erros de medição.

## 2.3.4.4 Contribuições

A metodologia de localização de faltas apresentada neste trabalho depende da medição da forma de onda de tensões ao longo do alimentador. Essa função, porém, pode ser feita a partir de diversos controladores instalados para outras finalidades. Dentre eles, podem ser citados: controlador de religadora, controlador de chaves, controlador de banco de capacitor, controlador de regulador de tensão.

Portanto, caminha-se no sentido de agregar valor às diversas funcionalidades de automação avançada, cuja relação benefício-custo sofre significativa melhora graças à sua utilização para um conjunto maior de finalidades.

## 2.3.5 O trabalho de (PARKER; MCCOLLOUGH, 2011)

Esse é um trabalho de revisão acerca de sensores de média tensão e o papel que deve desempenhar para o desenvolvimento das Redes Elétricas Inteligentes. É desenhado um breve histórico desses equipamentos, incluindo detalhes de concepção e comunicação, bem como as ressalvas com relação à confiabilidade dos testes que antecedem sua implantação.

## 2.3.5.1 Breve histórico dos sensores de média tensão

Inicialmente, o sensoriamento em média tensão era realizado por meio de Transformador de Corrente (TC), Transformador de Potencial (TP) e transdutores para geração dos sinais analógicos, que eram transmitidos via fios de cobre a um módulo de processamento.

Nos anos 1990, foi desenvolvido um dispositivo para monitorar a tensão, através de divisor resistivo, e para monitorar a corrente, medindo a magnitude do campo magnético. Fios de cobre eram utilizados para transmitir as grandezas analógicas do sensor até uma Unidade Terminal Remota (UTR) instalada no poste. Essa UTR calculava tensões, correntes e potências, cujos valores eram externalizados via rádio ou PLC.

As últimas evoluções no desenvolvimento de sensores de média tensão introduziram a tecnologia ótica. Células Pockels são empregadas para a medição de tensão e o conceito de Rotor de Faraday é aplicado à medição de corrente (PARKER; HARLEV; PRESOTTO, 2012). Com isso, instrumentos como TC e TP foram eliminados. Os dados são enviados via fibra ótica até uma cabine no poste, onde se tem um Processador Digital de Sinais (PDS) e eletrônica associada para tratar os sinais.

A precisão desse sensor se baseia fundamentalmente na etapa de processamento digital dos sinais. Por isso, é possível que correções, ajustes e melhorias sejam realizados em nível de *software*, dispensando a necessidade de trocar o *hardware*.

#### 2.3.5.2 Localização de Faltas

Os sensores de média tensão tendem a desempenhar papel fundamental no aumento da observabilidade da rede elétrica. Eles permitem fazer a aquisição de medições em tempo real do fluxo de potência, permitindo estimar os estados da rede elétrica com maior precisão e identificar o caminho da corrente de defeito.

Os algoritmos de localização de faltas podem fornecer um conjunto de possíveis locais de defeito. Parte desses possíveis locais é descartada a partir da informação da passagem ou não de corrente de curto-circuito pelos sensores. Adicionalmente, os sensores fornecem a informação da fase afetada, bem como dos níveis de corrente de defeito ao longo do alimentador.

## 2.3.5.3 Ressalvas

Os autores ressaltam que os sensores podem desempenhar papel importantíssimo na operação das redes elétricas, na melhoria da qualidade de energia e, com isso, no nível de satisfação dos clientes. Contudo, é preciso conduzir testes detalhados acerca do funcionamento esperado, dos níveis de precisão e dos efeitos do tempo (envelhecimento) desses dispositivos.

Uma vez que os testes indiquem resultados favoráveis sobre os diversos aspectos citados, os resultados técnicos e econômicos devem indicar, com o tempo, as melhorias esperadas, bem como maior inteligência agregada à operação da rede.

## 2.3.6 O trabalho de (MANASSERO; TAKEDA; FREITAS, 2014)

Os autores desse trabalho propõem metodologia para localização de faltas em redes de distribuição que possuam unidades de Geração Distribuída (GD). Para isso, ela se baseia em medições de tensão e corrente tanto na barra de conexão da subestação quanto nas barras de conexão das unidades de GD. Além disso, os algoritmos também se baseiam no conhecimento de parâmetros elétricos e topológicos da rede elétrica investigada.

## 2.3.6.1 O algoritmo

O algoritmo proposto investiga a possibilidade de defeito em cada um dos trechos do alimentador. Conforme descreve o diagrama da Figura 8, utiliza Algoritmo 1 ou Algoritmo 2, dependendo do tipo de trecho:

- □ Algoritmo 1: para trechos cujos fasores de tensão e de corrente são conhecidos em apenas uma das extremidades.
- □ Algoritmo 2: para trechos cujos fasores de tensão e de corrente são conhecidos em ambas as extremidades.



Figura 8 – Diagrama de blocos da metodologia Fonte: (MANASSERO; TAKEDA; FREITAS, 2014)

Como exemplo, tome-se o circuito da Figura 9. Para analisar o trecho 20-40, deve-se utilizar o Algoritmo 1, já que apenas o equivalente pela esquerda tem os fasores  $\dot{V}$  e  $\dot{I}$  conhecidos. Parte-se das fontes de tensão (subestação ou GD), em direção ao início do trecho investigado, obtendo  $\dot{V}$  e  $\dot{I}$  nesse ponto. Nesse trecho, supõe-se que  $\dot{I}_{falta} = \dot{I}_{20} - \dot{I}_{pr\acute{e}}$ . Em seguida, calculam-se x e  $R_{falta}$ , segundo a Equação 9, em que  $\bar{z}_{20-40}$  é a impedância, ohms por quilômetro, do trecho 20-40,  $\dot{I}_{20}$  é a corrente no trecho 20-40 injetada pelo nó 20, x é a distância do defeito em relação ao início do trecho e  $R_{falta}$  é a resistência de falta.

$$\dot{V}_{20} = z_{20-40} \cdot x \cdot \dot{I}_{20} + R_{falta} \cdot \dot{I}_{falta} \tag{9}$$



Figura 9 – Circuito exemplo Fonte: (MANASSERO; TAKEDA; FREITAS, 2014)

Para investigar o trecho 20-30, parte-se dos fasores de tensão e corrente da subestação e, com as impedâncias conhecidas, obtêm-se  $\dot{V}_{20}$  e  $\dot{I}_{20}$ . Por outro lado,  $\dot{V}_{30} = \dot{V}_{GD}$  e  $\dot{I}_{30} = \dot{I}_{GD}$ . A expressão da Equação 10 é empregada para o cálculo de x, a distância de falta em quilômetros. Nessa equação,  $l_{20-30}$  é o comprimento do trecho 20-30,  $\dot{I}_{20}$  é a corrente injetada no trecho pelo nó 20 e  $\dot{I}_{30}$  é a corrente injetada no trecho pelo nó 30.

$$x = \frac{\dot{V}_{20} - \dot{V}_{30} + \bar{z}_{20-30} \cdot l_{20-30} \cdot \dot{I}_{30}}{(\dot{I}_{20} + \dot{I}_{30}) \cdot \bar{z}_{20-30}}$$
(10)

## 2.3.6.2 Requisitos de dados

A metodologia proposta se baseia no conhecimento de parâmetros elétricos e topológicos, na medição de tensão e corrente no início do alimentador e também nas barras de conexão das unidades de GD. Os requisitos de dados para essa abordagem têm, portanto, o acréscimo das medições nos pontos de conexão de GD.

Os autores não mencionam qual tipo de equipamento deve ser empregado para fazer as medições nas unidades de GD. Além disso, não mencionam a necessidade de sincronização entre os equipamentos de medição, nem como se faz a transmissão dos dados entre esses equipamentos e o local onde o algoritmo é executado.

## 2.3.6.3 Críticas

Uma primeira ressalva pode ser feita com relação à modelagem das cargas. É considerado o modelo de impedância constante. Na prática, as cargas têm um comportamento diferenciado no instante do defeito (ZHU; LUBKEMAN; GIRGIS, 1997). Além disso, a abordagem apresentada no artigo desconsidera a variação do comportamento dos geradores no instante do defeito (afetado pelas reatâncias transitória e sub-transitória), sendo modelado por equivalentes de Thèvènin.

## 2.3.6.4 Contribuições

A metodologia proposta por esse trabalho traz avanços no sentido de se usarem medições de tensão e corrente não somente na subestação, como também nos pontos de conexão de unidades de GD. Trata-se da utilização dos registros de formas de onda pelos medidores dos geradores, que subsidiam a funcionalidade de localização de faltas.

Outrossim, a ideia apresentada indica a superação do obstáculo que a GD tem apresentado para os algoritmos de localização de faltas, devido à contribuição dos geradores distribuídos para a corrente de defeito.

## 2.3.7 O trabalho de (TRINDADE et al., 2014)

Esse trabalho desenvolve uma metodologia de localização de faltas com base em algumas funcionalidades dos medidores inteligentes. Dentre elas, destacam-se: notificação de interrupção e possibilidade de leitura sob demanda. Além disso, os autores exploram o fato de que esses medidores apresentam medições bastante precisas, com erros que variam de  $0,1 \ge 0,5 \%$ .

## 2.3.7.1 Requisitos de dados

A metodologia que os autores propõem necessita das medições de tensão dos pontos que possuem medidores inteligentes. Nota-se que é possível implementar o algoritmo apenas com os módulos das tensões medidas, o que reduz a quantidade de dados necessária.

A funcionalidade de *ping* dos medidores é fundamental para melhorar o desempenho do algoritmo de modo geral. A verificação do estado de um medidor permite agilizar o processo de pesquisa do ponto de defeito.

Além disso, é necessário também conhecer os parâmetros elétricos e topológicos do alimentador analisado, bem como de informações georreferenciadas dos medidores utilizados.

## 2.3.7.2 Descrição do algoritmo

A metodologia matemática proposta se baseia no fato de que os nós do alimentador apresentam queda de tensão no instante do defeito. Supondo que as cargas sejam modeladas por impedâncias constantes, essas impedâncias são consideradas internas à matriz de impedâncias da rede.

As que das de tensão durante o defeito são dadas segundo a Equação 11, em que  $V_i^{(abc)_f}$  e  $V_i^{(abc)_f}$  representam os fasores de tensão de pré e pós-falta, respectivamente, na barra *i*.

$$\Delta \dot{V}_i^{(abc)} = \dot{V}_i^{(abc)_p} - \dot{V}_i^{(abc)_f} \tag{11}$$

Considerando a formulação exposta, para um defeito em um nó k, pode-se calcular  $\dot{I}_{falta_k}^{(abc)}$  de  $N_{fm}$  maneiras (vide Equação 12), em que  $N_{fm}$  representa o número de pontos de medição.

$$\dot{I}_{falta_k}^{(abc)} = (\bar{Z}_{ik}^{(abc)})^{-1} \cdot \Delta \dot{V}_i^{(abc)}, i = 0, 1, ..., N_{fm}$$
(12)

Efetivamente, o algoritmo se baseia no teste de defeito em todas as possíveis barras do sistema. Para um teste de defeito em uma barra k, pode-se calcular  $N_{fm}$  valores de corrente de falta, segundo o exposto acima. Com esses valores, obtém-se um valor médio  $I_{falta_k}^{med}$ . Então, gera-se um índice  $\delta_k$ , que contabiliza a soma dos módulos das diferenças entre os  $N_{fm}$  valores de corrente de falta e o valor médio  $I_{falta_k}^{med}$ . O teste que resultar o menor índice representa a barra onde provavelmente ocorreu o defeito.

## 2.3.7.3 Considerações

Primeiramente, nota-se que a metodologia proposta pelos autores utiliza equipamentos que representam a tendência em redes elétricas inteligentes: medidores inteligentes. A utilização desses equipamentos para a finalidade de localização de faltas confere papel importante na área de automação e localização de faltas, além da sua natural aplicação para faturamento.

Um ponto a ser destacado é a funcionalidade que permite verificar o estado de operação do medidor. Isso permite determinar se o local foi realmente afetado por uma falta de energia, validando os resultados do algoritmo.

Os autores não mencionam, porém, como lidar com o problema de unidades de geração distribuída conectadas ao longo do alimentador. Esse é um problema importante, já que deve haver impacto na matriz de impedâncias nodais do sistema. Não fica claro como deve ser feita a implementação da estrutura de medição inteligente que permita extrair os dados de medição, bem como capturar as notificações de interrupção.

## 2.3.8 O trabalho de (CORDOVA; FARUQUE, 2015)

Em (CORDOVA; FARUQUE, 2015), os autores sugerem metodologia para localização de faltas de alimentadores de distribuição, com o auxílio de dados capturados por equipamentos de medição instalados no sistema. Os dados topológicos do alimentador investigado são imprescindíveis.

A metodologia de cálculo é iterativa. Em cada iteração, realiza-se um teste de defeito em um ponto do sistema, gerando um erro de cálculo (entre valores medidos e valores calculados). O local do defeito é aquele cujo teste gera o menor erro.

## 2.3.8.1 Requisitos de dados

Esse trabalho sugere a utilização de equipamentos de medição distribuídos ao longo do alimentador. Dentre eles, pode-se citar: IEDs, controladores de religadoras, medidores inteligentes, etc. Os autores citam os medidores inteligentes kV2c da GE, que contém a funcionalidade de registrar eventos de afundamentos de tensão, uma forma de medição da tensão ao longo da rede de distribuição. O trabalho menciona que deve haver monitoramento no início do alimentador e nos pontos de geração distribuída.

É fundamental conhecer alguns parâmetros da rede, como comprimentos e impedâncias de cabos e estados de chaves. A partir dessas informações de rede, monta-se a matriz de impedâncias da rede.

## 2.3.8.2 O algoritmo de Localização de Faltas

A formulação matemática se baseia no conceito de estimação de estados. Nesse conceito, obtém-se um vetor de tensões estimadas para todos os pontos do alimentador, a partir de um conjunto de medições fasoriais de tensão e corrente.

O trabalho propõe a montagem do vetor de medições (lado esquerdo da Equação 13) utilizando as tensões efetivamente medidas, as correntes da subestação e das unidades de GD e a corrente de falta numa posição de teste. A estimação de estados é executada e o vetor de tensões estimadas (lado direito da Equação 13) é calculado. Então, ele é aplicado à expressão matricial da Equação 13, que é comparado com o vetor montado inicialmente.

$$\begin{bmatrix} v_{abc}^{1}(F) \\ \dots \\ v_{abc}^{p}(F) \\ I_{abc}^{SE}(F) \\ \dots \\ 0 \\ \dots \\ I_{abc}^{GD,1}(F) \\ \dots \\ I_{abc}^{GD,K}(F) \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi \\ \mathbf{Y}_{abc}^{bus} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{abc}^{1}(F) \\ \dots \\ V_{abc}^{i}(F) \\ \dots \\ V_{abc}^{n}(F) \end{bmatrix}$$
(13)

Nessa expressão,  $\boldsymbol{\Phi}$  é uma matriz de permutação, que relaciona o vetor de tensões nos pontos de medição  $\begin{bmatrix} v_{abc}^1(F) & v_{abc}^2(F) & \dots & v_{abc}^p(F) \end{bmatrix}^T$  com o vetor de tensões em todos os nós da rede  $\begin{bmatrix} V_{abc}^1(F) & V_{abc}^2(F) & \dots & V_{abc}^n(F) \end{bmatrix}^T$ .  $\mathbf{Y}_{abc}^{\mathbf{bus}}$  é a matriz de admitâncias nodais da rede.

Dessa comparação, obtém-se um erro associado ao teste. Por fim, o teste que gerar o menor erro corresponde à posição do defeito.

#### 2.3.8.3 Considerações

O trabalho de (CORDOVA; FARUQUE, 2015) traz alguns avanços nas metodologias de localização de faltas, porque envolve tecnologias de medição e automação, diversidade de fontes de dados e tecnologias de comunicação (leitura das medições e estados dos equipamentos).

O desenvolvimento de uma ferramenta matemática recursiva - baseada em Estimação de Estados - pode ser considerado um ponto de inovação. Ressalvam-se as aproximações e considerações, como o descarte das correntes de carga durante o curto-circuito. Os erros decorrentes dessas aproximações podem afetar todas as iterações igualmente, de modo que o resultado final não seja afetado.

## 2.3.9 O trabalho de (CAPELINI et al., 2016)

Esse trabalho apresenta uma metodologia para localização de faltas com especial foco em alimentadores primários rurais. Os autores mencionam que, nesses casos, principalmente no nordeste do Brasil, não se empregam equipamentos inteligentes e/ou georreferenciados nos alimentadores, pois eles são caros e são alvo de vandalismo. Não raro, são necessárias 24 horas para restaurar o fornecimento de energia a consumidores rurais nessa região do país. A metodologia apresentada pode ser considerada uma ferramenta capaz de reduzir drasticamente os tempos de restauração do sistema.

## 2.3.9.1 A metodologia

A metodologia propõe a instalação temporária de indicadores de falta - *Temporary Fault Indicator* (TFI) - em uma região reduzida do alimentador, que sabidamente tenha sido afetada pelo defeito. Após a instalação de diversos indicadores de falta nessa região, o elemento de proteção que atuou é religado, fazendo a corrente de curto-circuito fluir novamente para o ponto do defeito. Logo em seguida, o elemento de proteção volta a atuar e a corrente de defeito é novamente extinta.

O pequeno tempo de teste de defeito é suficiente para sensibilizar os indicadores de falta. Eles estão conectados via rede *mesh* (rede de comunicação em malha, baseada em ondas de rádio) a um dispositivo central. Além disso, os indicadores são dotados de identificação georreferenciada. Um *display* (como um *tablet*) ilustra os indicadores de falta que foram sensibilizados pela falta e também os que não foram, traçando o caminho da corrente de defeito.

## 2.3.9.2 Estudo de caso

Os autores consideraram um evento de curto-circuito que afetou um alimentador rural da distribuidora Energisa. O instante do teste de falta é ilustrado pela Figura 10. A chave S é a religadora que ficou permanentemente aberta após as tentativas de religamento. Após a instalação dos TFIs, a chave S foi fechada e a falta foi imposta à rede, sensibilizando alguns sensores, indicados em vermelho. Com essa indicação, foi possível identificar o caminho percorrido pela corrente de falta.

Entre detecção da falta, mobilização e deslocamento da equipe de manutenção, instalação dos TFIs e identificação do local da falta, contabilizou-se um tempo 65 % menor que o necessário para restaurar a falta sem essa metodologia.



Figura 10 – Sensibilização dos sensores de corrente durante teste de falta Fonte: (CAPELINI et al., 2016)

## 2.3.9.3 Considerações

Algumas ressalvas devem ser tecidas quanto a esse trabalho. Primeiramente, os sensores não estão instalados permanentemente, impossibilitando uma operação automática e integrada a outros sistemas. Além disso, a metodologia apresentada depende de um posicionamento ótimo dos dispositivos indicadores de falta, de modo a cobrir toda a área de busca. A metodologia pode ter problemas com alimentadores primários muito ramificados.

Por outro lado, o trabalho propõe a localização de falta com base em equipamentos dotados de comunicação móvel, que contém identificação georreferenciadas e que traduzem a condição do curto-circuito independentemente de um modelo elétrico do alimentador. Essa tradução é conseguida em virtude do georreferenciamento dos equipamentos sobreposto a uma base de dados georreferenciada. De modo geral, esse trabalho pavimenta o caminho da utilização de sensores de corrente em média tensão para identificação do caminho da corrente de defeito. Trata-se de uma informação não necessariamente elétrica, mas georreferenciada. Isso demonstra a utilização de informação não-elétrica para subsidiar a funcionalidade de localização de faltas.

## 2.4 Análise de faltas em regime permanente

Esta seção trata da análise das grandezas elétricas durante o curto-circuito para localizar defeitos considerando suas componentes de frequência fundamental. Apresentam-se trabalhos que fazem essa consideração para localização de faltas.

## 2.4.1 Correntes de defeito

Devido à presença de cargas, não-homogeneidade dos trechos de linha, os sistemas de distribuição apresentam correntes de curto-circuito desequilibradas. O evento de curtocircuito pode ser considerado uma composição de três instantes. Primeiramente, nota-se a condição de operação normal (pré-falta). Depois, observa-se o intervalo de defeito, que dura de fração de ciclo a alguns ciclos. Por fim, nota-se a condição pós-falta, resultante da atuação dos esquemas de proteção. Esses instantes são ilustrados pela Figura 11.



Fonte: (SENGER et al., 2005) (adaptado)

Embora não-senoidal, a corrente durante o intervalo de falta apresenta uma componente fundamental. Ela pode ser extraída através de processamento digital de sinais, para que seja utilizada por algoritmos de localização de faltas, por exemplo.

## 2.4.2 Simulação de defeitos em regime permanente

Embora as correntes de curto-circuito apresentem distorções devido a componentes harmônicas, muitos trabalhos propõem a análise de curto-circuito considerando apenas a componente fundamental. O trabalho de (ERLINGHAGEN et al., 2015) faz cálculos de curto-circuito para rede com geração distribuída, a partir de dois métodos: simulação em regime permanente - domínio da frequência - e simulação dinâmica - domínio do tempo. Verifica-se que o tempo de simulação é bem menor quando se considera a simplificação de regime permanente. As correntes calculadas têm desvio desprezível.

O trabalho de (ABUSDAL; HEYDT; RIPEGUTU, 2015) propõe sistema para detecção de faltas do tipo *back-fed ground faults*, que consistem em cabo caído (do lado da fonte) tocando o chão. A implementação do sistema envolve as medições, AMI e um sistema DMS. Os autores fazem as simulações utilizando o OpenDSS (EPRI (Electric Power Research Institute), 2015) - cálculos em regime permanente - para capturar as tensões e correntes nos elementos da rede.

## 2.4.3 Localização de Faltas em regime permanente

Muitos trabalhos de localização de faltas baseados em impedância propõem metodologias que realizam cálculos elétricos a partir dos fasores. Ou seja, eles necessitam da componente fundamental das grandezas de tensão e corrente para determinar o ponto de defeito.

O trabalho de (GIRGIS; FALLON, 1992) utiliza DFRs (*Digital Fault Recorders*), que registram as formas de onda de tensão e corrente em um ponto de uma linha de transmissão. Os fasores dessas grandezas, durante o defeito, são então calculados. Método similar é feito em (ZHU; LUBKEMAN; GIRGIS, 1997), em que esses fasores são calculados a partir das formas de onda durante o defeito. Em (SENGER et al., 2005), os fasores de tensão e corrente são estimados a partir do intervalo do defeito registrado pelas oscilografias, obtidas por IEDs.

O cálculo desses fasores pode ser feito aplicando-se Transformada de Fourier para uma janela de tempo que contenha o período de defeito. Procedimento semelhante pode ser aplicado a uma janela de tempo anterior ao defeito (para determinar as condições pré-falta) e posterior ao defeito (para estimar os estados do sistema após a atuação das proteções).

## 2.5 Considerações finais

## 2.5.1 Síntese dos trabalhos

Na seção anterior, foram analisados diversos trabalhos, sendo apresentadas e detalhadas suas principais características: dados de entrada e tipo de abordagem. Os principais insumos de entrada considerados são:

- Topologia Modelo digital da rede de distribuição, contendo as posições, comprimentos e conectividades dos elementos da rede;
- $\Box$   $\dot{V}_{SE}$  e  $\dot{I}_{SE}$  Medições fasoriais de tensões e correntes obtidos na subestação durante a falta;
- $\square$   $|\dot{V}|$  Medições dos módulos de tensões ao longo da rede durante a falta;

Em geral, os trabalhos consideram as seguintes abordagens de localização de faltas:

- $\Box \bar{Z}_{vista}$  Algoritmo determina o local da falta a partir do cálculo da impedância vista a partir de um ponto de medição;
- $\Box$   $|\Delta \dot{V}|$  Localização da falta é determinada com base em medições de afundamentos de tensões ao longo da rede no instante da falta;
- Otimização Algoritmo implementa algum processo de otimização para determinação das características da falta;

Na Tabela 1, as referências bibliográficas apresentadas na seção anterior são analisadas considerando esses parâmetros de dados de entrada e abordagem de localização.

Trabalho		Dados de entrad	la		Abordager	n
	Topologia	$\dot{V}_{SE}, \dot{I}_{SE}$ na SE	$ \dot{V} $ na rede	$\bar{Z}_{vista}$	$ \Delta \dot{V} $ na rede	Otimização
1		Х		Х		
2	Х	Х		Х		
3	Х	Х		Х		
4	Х	Х		Х		
5	Х	Х	Х	Х		Х
6	Х		Х		Х	
7	Х		Х		Х	
8	Х		Х		Х	Х
9	Х		Х		Х	
10			Х			
11	Х	Х		Х		
12	Х		Х		Х	
13	Х	Х	Х			Х
14			Х			

Tabela 1 – Síntese dos trabalhos analisados

Com base nos dados sintetizados na tabela, nota-se que praticamente todos os trabalhos consideram dados topológicos como dados de entrada. Os trabalhos de 1 a 5, que propõem técnicas tradicionais de localização de faltas, se baseiam em medições de tensões e correntes na subestação. Por outro lado, praticamente todos os trabalhos de 6 a 14, baseados em automação distribuída, consideram medições de tensão ao longo da rede, em vez de se restringirem às medições na subestação.

Com relação à abordagem de localização, os trabalhos de 1 a 5 propõem localização de faltas a partir do cálculo da impedância vista no único ponto de medição: a subestação. Por outro lado, diversos trabalhos que se baseiam em automação distribuída propõem algoritmos baseados nas medições de tensões ao longo do sistema de distribuição. Em alguns desses trabalhos, considera-se alguma etapa de otimização de parâmetros para determinação das características da falta.

## 2.5.2 Contribuições dos trabalhos

As primeiras metodologias de localização de faltas foram desenvolvidas para sistemas de transmissão. Adaptações dessas metodologias serviram de base para as primeiras técnicas de localização de faltas em redes de distribuição, que se baseiam, de modo geral, em medições dos fasores de tensão e corrente na saída do alimentador, durante e após o curto-circuito. Os dados detalhados da rede, tais como fontes equivalentes, topologia e parâmetros elétricos, também são insumos que desempenham papel fundamental nessas técnicas.

Apesar de demandarem a implantação de poucos equipamentos de monitoramento, as metodologias tradicionais de localização de faltas podem ter seus resultados fortemente prejudicados por não estarem integradas aos demais sistemas técnicos da distribuidora, que poderiam prover informações em tempo real de estados de chaves, por exemplo. Outras informações podem afetar os resultados, embora com menor impacto. Dentre elas, citam-se medições de correntes em ramais e de potências injetadas por unidades geradoras, estado de consumidores e topologia de rede.

As técnicas de localização de faltas com automação distribuída representam grande avanço para a localização de curto-circuitos. Ela pode ser feita a partir de informações de diferentes naturezas, provenientes de fontes diversas, como sistemas de operação da rede, dispositivos de proteção, medição inteligente, dentre outras. Os trabalhos analisados propõem localização de faltas utilizando um número reduzido dessas fontes de dados, provavelmente devido à falta de recursos à época.

Este trabalho se apoia na abordagem de localização de faltas a partir do contexto de automação distribuída. Esse contexto representa um passo importante no sentido de tornar as redes elétricas inteligentes, em que os equipamentos e os sistemas podem se destinar a múltiplas funcionalidades. A inovação proporcionada por este trabalho consiste em utilizar informações distintas, como medições de grandezas elétricas, estados de chaves e alarmes de sensores, para subsidiar o algoritmo de localização de faltas. De maneira geral, é uma proposta de como utilizar os diversos dados disponíveis em Redes Elétricas Inteligentes para localizar curto-circuitos.

# Capítulo 3

## Conceitos de computação evolutiva para aplicação em Localização de Faltas

## 3.1 Considerações iniciais

Este capítulo apresenta os principais aspectos de algoritmos evolutivos, que compreendem um conjunto de metodologias de inteligência artificial para resolução de problemas genéricos. Neste trabalho, os algoritmos evolutivos são essenciais para o refinamento da localização de faltas.

## 3.2 Introdução

Em um sistema biológico, um determinado indivíduo tem suas características codificadas através dos genes, que constituem os cromossomos. O conjunto completo dos cromossomos de um indivíduo é denominado "genótipo". A manifestação de características com base nos cromossomos e na influência dos fatores externos é denominada "fenótipo".

Como resultado das interações entre indivíduos em uma determinada geração, são gerados indivíduos filhos. Portanto os indivíduos iniciais são denominados "pais", sendo capazes de transmitir parte de suas características aos filhos resultantes.

Os indivíduos de uma espécie podem, ao longo das gerações, ser afetados por dois fenômenos distintos: a recombinação (cruzamento) e mutação. No primeiro caso, dois indivíduos geram filhos cujo material genético é uma combinação daqueles dos pais. Assim, os filhos podem apresentar traços dos pais concomitantemente.

No caso de mutação, um indivíduo pode ter seu material genético alterado de maneira irreversível. Esta alteração pode lhe proporcionar características e habilidades benéficas ou então letais. De modo geral, a mutação atua inserindo variabilidade aos indivíduos de uma espécie (GABRIEL; DELBEM, 2008).

## 3.3 Algoritmos evolutivos

## 3.3.1 Princípios

Diversas áreas de pesquisa investigam situações de difícil equacionamento. Muitas vezes, não existem formulações analíticas determinísticas ou então o número de variáveis envolvidas é muito grande, tornando o equacionamento muito complexo. A computação evolutiva cumpre o papel de encaminhamento alternativo a estes problemas, através dos seus métodos, denominados Algoritmos Evolutivos (AEs) (ZUBEN, 2000).

A fundamentação teórica para os AEs tem suas bases na biologia, no estudo do comportamento das espécies, que interagem com os elementos ambientais que as cercam e pelos quais são afetadas. Os indivíduos possuem características determinadas geneticamente, que podem, em maior ou menor grau, estar presentes nos indivíduos descendentes.

Indivíduos com um conjunto de determinados traços se mostram mais capazes de sobreviverem em seu ambiente. Diz-se que eles estão mais "adaptados" e aptos a se perpetuarem.

Partindo da hipótese evolucionista de que apenas os indivíduos mais adaptados se perpetuam ao longo das gerações, os AE são uma abstração do problema efetivamente investigado. Os indivíduos de uma determinada geração são considerados soluções para o problema em questão. Sujeitos às restrições e condições de contorno do problema, esperase que, à medida que as gerações avançam, seus indivíduos representam soluções mais próximas da solução buscada.

## 3.3.2 Etapas do algoritmo evolutivo

Os indivíduos têm como características intrínsecas os parâmetros da solução que se deseja obter. Cada geração de indivíduos representa uma iteração do algoritmo. Para uma determinada iteração, alguns procedimentos são executados envolvendo os indivíduos, conforme indica a Figura 12.

Inicialmente, é gerado um conjunto de indivíduos, que são avaliados quanto às suas características. Dado que um indivíduo representa uma solução do problema, quanto maior sua proximidade em relação à solução buscada, melhor será a avaliação do indivíduo.

Em seguida, são selecionados os indivíduos que passarão à geração seguinte. Uma forma de seleção é considerar aqueles mais bem avaliados. Alternativamente, pode-se aplicar o conceito de roda da fortuna, em que os indivíduos selecionados são sorteados, sendo que sua probabilidade de ser sorteado é proporcional à sua avaliação.

A etapa seguinte consiste na aplicação dos operadores cruzamento e mutação. Similarmente àquilo que ocorre em organismos vivos, o processo de cruzamento envolve duas soluções distintas, cujas características são combinadas, segundo alguma operação matemática, gerando uma solução descendente intermediária em relação às iniciais.



Figura 12 – Fluxograma dos algoritmos evolutivos Fonte: autor

No caso de mutação, uma dada solução sofre alteração de suas características, segundo uma regra pré-estabelecida de variabilidade estatística. Esse processo gera soluções filhas, com características que apresentam desvios em relação às características iniciais, introduzindo, portanto, variabilidade ao conjunto de soluções.

O novo conjunto de indivíduos, gerados a partir da aplicação dos operadores mutação e cruzamento, é submetido a uma avaliação. Ela quantifica a razoabilidade da solução que cada indivíduo representa. Quanto mais ele se aproxima da solução buscada, melhor é a sua avaliação.

Depois de avaliados, os indivíduos são sujeitos a um mecanismo de seleção. Um exemplo desse mecanismo é considerar um número pré-definido dos indivíduos mais bem avaliados. Nesse ponto, se uma condição de parada for satisfeita, o algoritmo de EE é interrompido e o melhor indivíduo gerado até então é considerado como solução do problema.

## 3.3.3 Abordagens de Algoritmos Evolutivos

Neste trabalho, apresentam-se duas das principais abordagens para algoritmos evolutivos (ARRUDA, 2008):

## □ Algoritmos genéticos

Os algoritmos genéticos foram introduzidos por Holland em 1975 (HOLLAND, 1975) com o objetivo de formalizar matematicamente e explicar rigorosamente processos de adaptação em sistemas naturais e desenvolver sistemas artificiais (simulados em computador) que retenham os mecanismos originais encontrados em sistemas naturais. Os algoritmos genéticos empregam os operadores de *crossover* (operador de cruzamento - principal) e mutação (operador secundário). Nesses algoritmos, os indivíduos são representados por vetores de codificação binária de suas características.

## Estratégias evolutivas

As estratégias evolutivas (EEs) foram desenvolvidas com o objetivo de solucionar problemas de otimização de parâmetros, tanto discretos quanto contínuos. Como inicialmente utilizavam apenas os operadores de mutação, grandes contribuições em relação à análise e síntese destes operadores foram obtidas (GABRIEL; DELBEM, 2008).

## 3.3.4 Estratégias Evolutivas

### 3.3.4.1 Definições

Em Estratégias Evolutivas (EE), um indivíduo é representado por valores reais diretamente ligados aos parâmetros de otimização do problema. Esses valores reais são as variáveis-objetivo  $A = (a_1, a_2, ..., a_n)$ , tendo a elas um vetor de desvios-padrão  $\delta = (\sigma_{a_1}, \sigma_{a_2}, ..., \sigma_{a_n})$  associado.

Para o problema de localização de faltas, são duas as incógnitas:  $a_1 = x$  (posição do defeito) e  $a_2 = R_f$  (resistência de falta). Então, um indivíduo é representado por  $A = (x_{indiv}, R_{f_{indiv}}) \in \delta = (\sigma_{x_{indiv}}, \sigma_{R_{f_{indiv}}}).$ 

Nos algoritmos de EE, o principal operador é a mutação, que recebe como entrada um indivíduo pai e produz como saída um conjunto de indivíduos filhos. A mutação opera no sentido de inserir variabilidade às características de uma espécie.

O cruzamento, por sua vez, é considerado em EE um operador secundário, incidindo sobre uma proporção menor de indivíduos. O operador recebe dois indivíduos pais como entrada e gera um indivíduo filho como saída.

Pode-se definir o conceito de idade como o número de gerações vivenciadas por um indivíduo. Portanto, um dos parâmetros de configuração do algoritmo é a idade máxima dos indivíduos. Superada essa idade, o indivíduo deixa de existir.

Um processo de avaliação é executado com os indivíduos pais, filhos por mutação e filhos por cruzamento. Nesse processo, os parâmetros de um dado indivíduo são inseridos em uma expressão matemática para se obter a função de avaliação daquele indivíduo.

Em seguida, é feita a seleção dos melhores indíviduos da geração. Se o objetivo do problema for maximizar a função de avaliação, são selecionados os indivíduos com os maiores valores de função de avaliação. Caso se busque minimar a função de avaliação, são selecionados indivíduos com os menores valores de função de avaliação.

Essa sequência de repete por algumas gerações, até que uma condição de parada seja atingida. Um critério de parada para uma dada geração se baseia na diferença entre a função de avaliação do melhor indivíduo e a média das funções de avaliação dos indivíduos da geração. Considera-se que a condição de parada é atingida quando essa diferença for menor que um determinado limite pré-configurado.

## 3.3.4.2 Operador Mutação

A mutação consiste na inserção de variabilidade a cada posição do vetor de variáveisobjetivo. Isso ocorre a partir da adição de valor aleatório com distribuição normal de média zero e desvio-padrão unitário  $N_i(0,1)$ , conforme ilustra a Equação 14, em que  $x'_i$  é valor do parâmetro  $x_i$  do indivíduo filho.

$$x_i' = x_i + \sigma_{x_i} \cdot N_i(0, 1) \tag{14}$$

Nessa equação,  $\sigma_{x_i}$  é o passo de mutação da variável  $x_i$ , característico do indivíduo analisado. Se seu valor for pequeno, a mutação se dá lentamente. Caso contrário, indivíduos com características variadas são rapidamente gerados.

De acordo com (BACK; HAMMEL; SCHWEFEL, 1997), Schwefel propôs que o passo de mutação também fosse sujeito à mutação, de modo que ela se dê mais lentamente ou mais rapidamente, de acordo com a dinâmica do processo evolutivo. Esse processo é denominado "auto-adaptação".

Dado que um indivíduo pode ser representado pelos vetores  $X = (x_1, x_2, ..., x_n)$  e  $\delta = (\sigma_{x_1}, \sigma_{x_2}, ..., \sigma_{x_n})$ , a mutação com auto-adaptação pode ser descrita pelas Equações 15:

$$\sigma'_{x_i} = \sigma_{x_i} \cdot exp(\tau' \cdot N(0, 1) + \tau \cdot N_i(0, 1))$$
(15a)

$$x_i' = x_i + \sigma_{x_i}' \cdot N_i(0, 1) \tag{15b}$$

em que

- $\sigma'_i$  Valor atualizado do passo de mutação do parâmetro  $x_i$ .
- $\sigma_i$  Passo de mutação do parâmetro  $x_i$ .
- $N_i(0,1)$  Valor sorteado a cada geração, com distribuição normal de média zero e desvio-padrão unitário.
- N(0,1) valor sorteado a cada geração, com distribuição normal de média zero e desvio-padrão unitário. Esse valor é mantido constante para o indivíduo.
- $\tau'$  Taxa de aprendizado. Faz-se  $\tau' = 1/\sqrt{2\beta}$ .
- $\tau$  Taxa de aprendizado. Faz-se  $\tau = 1/\sqrt{2\sqrt{\beta}}$ .
- $\beta$  Frequentemente, usa-se  $\beta = 2$ .

## 3.3.4.3 Operador Cruzamento

Para a obtenção do vetor de variáveis-objetivo do indivíduo resultante de cruzamento, (ZVIETCOVICH, 2011) cita o método de "recombinação intermediária local", que se baseia nas Equações 16:

$$x_i^{(3)} = a \cdot x_i^{(1)} + (1-a) \cdot x_i^{(2)}$$
(16a)

$$\sigma_i^{(3)} = a \cdot \sigma_i^{(1)} + (1 - a) \cdot \sigma_i^{(2)}$$
(16b)

em que

$x_i^{(1)}, x_i^{(2)}$	variável-objetivo $i$ dos indivíduos pais (1 e 2, respectivamente);
$x_i^{(3)}$	variável-objetivo $i$ do indivíduo resultante (3);
$\sigma_i^{(1)}, \sigma_i^{(2)}$	desvio-padrão da variável-objetivo $i$ dos indivíduos pais (1 e 2, respecti-
	vamente);
$\sigma_i^{(3)}$	desvio-padrão da variável-objetivo $i$ do indivíduo resultante (3);
a	número aleatório sorteado a partir de distribuição uniforme no intervalo
	real $[0, 1];$

Graficamente, o processo de recombinação intermediária local pode ser esquematizado como ilustrado na Figura 13. No espaço de busca, por exemplo bidimensional, o indivíduo resultante do cruzamento fica localizado sobre a reta que une os indivíduos pais. Se a = 1/2, o filho fica exatamente entre os pais, de tal modo que as variáveis-objetivo resultantes são a média aritmética das dos pais.

## 3.3.4.4 Avaliação e seleção dos indivíduos

Ao empregar Estratégia Evolutiva para Localização de Faltas, define-se a função de avaliação  $f_{aval}$  de um determinado indivíduo em termos dos desvios médios das grandezas elétricas representadas pelo indivíduo e suas respectivas medições.

Através da simulação de curto-circuito com as características de posição e resistência de falta representadas por um indivíduo i, são calculadas tensões e as correntes. Elas são comparadas com as respectivas medições de tensões e correntes, por meio dos desvios médios  $\epsilon_V^i$  e  $\epsilon_I^i$ , que são calculados conforme as Equações 17a e 17b, respectivamente. Nessas expressões,  $N_{medV}$  é o número de pontos de medição de tensão e  $N_{medI}$  é o número de pontos de medição de corrente, f é o índice de fase (f = 1, 2, 3). Os totais de diferenças somadas são  $N_{medTot_V} = 3 \cdot N_{medV}$  e  $N_{medTot_I} = 3 \cdot N_{medI}$ .

A partir dos desvios  $\epsilon_V^i \in \epsilon_I^i$ , a função de avaliação do indivíduo *i* é calculada segundo a Equação 17c. Nessa expressão,  $K_V \in K_I$  são os pesos para as medições de tensão e



Figura 13 – Ilustração do processo de recombinação local Fonte: autor

corrente, respectivamente.

$$\epsilon_V^i = \left(\sqrt{\sum_{j=1}^{N_{medV}} \sum_{f=1}^3 \left( |\dot{V}_{calc_j}^f| - |\dot{V}_{med_j}^f| \right)^2} \right) / N_{medTot_V}$$
(17a)

$$\epsilon_I^i = \left(\sqrt{\sum_{j=1}^{N_{medI}} \sum_{f=1}^3 \left( \left| \dot{I}_{calc_j}^f \right| - \left| \dot{I}_{med_j}^f \right| \right)^2} \right) / N_{medTot_I}$$
(17b)

$$f_{aval}^{i} = \frac{K_{V} \cdot \epsilon_{V}^{i} + K_{I} \cdot \epsilon_{I}^{i}}{K_{V} + K_{I}}$$
(17c)

Na etapa de seleção de indivíduos para a geração seguinte, são selecionados aqueles que possuem os menores desvios  $\epsilon_V \in \epsilon_I$ . Ou seja, são selecionados os indivíduos com os menores valores de função de avaliação.

#### 3.3.4.5 Critério de parada

Neste trabalho, foi adotado um critério de parada que se baseia na função de avaliação do melhor indivíduo  $(f_{aval}^{min})$  e no valor médio das funções de avaliação dos indivíduos da geração  $(f_{aval}^{med})$ . Quando a diferença entre eles  $(\Delta f)$  é inferior a um valor mínimo préconfigurado  $(\Delta f_{min})$ , o critério de parada é satisfeito e as iterações do algoritmo são interrompidas.

Considere-se um processo evolutivo cujo objetivo é minimizar a função de avaliação. As funções de avaliação dos indivíduos são plotadas no gráfico da Figura 14. Também são traçadas a curva dos valores médios  $(f_{aval}^{med})$  e a curva das melhores avaliações  $(f_{aval}^{min})$ . Quando a Equação 18 é satisfeita, o processo evolutivo é interrompido. No exemplo da figura, essa condição ocorre para a quarta geração.



Figura 14 – Funções de avaliação Fonte: autor

$$f_{aval}^{med} - f_{aval}^{min} < \Delta f_{min} \tag{18}$$

## **3.4** Exemplos ilustrativos

## 3.4.1 Determinação do máximo de uma função

Considere-se o problema matemático de determinação do valor máximo da função F(x) descrita pela Equação 19. Essa função é apresentada graficamente pela Figura 15. O objetivo da aplicação do algoritmo de EE a esse exemplo é determinar o parâmetro x do ponto de máximo, destacado em vermelho. Ou seja,  $x_{Fmax} = 5$ .

$$F(x) = 15 \cdot \sin\left(\frac{\pi x}{10}\right) + 5 \cdot \sin\left(\frac{5\pi x}{10}\right) \tag{19}$$

As configurações selecionadas para o algoritmo de EE são descritas a seguir.

- $\hfill\square$ Número de indivíduos iniciais: 10
- $\hfill\square$ Número máximo de indivíduos por geração: 10
- $\hfill \Box$ Filhos, por indivíduo, na mutação: 3
- Idade máxima: 2 gerações
- $\Box$  Função de avaliação a ser maximizada:  $f_{aval} = F(x)$

 $\Box$ Critério de parada:  $\Delta f = f_{aval}^{m\acute{a}x} - f_{aval}^{m\acute{e}d} < \Delta f_{min}, \ \mathrm{com} \ \Delta f_{min} = 0,01$ 



Figura 15 – Representação gráfica da função F(x)Fonte: autor

Inicialmente, executa-se o algoritmo evolutivo de acordo com as configurações apresentadas e considerando a população inicial ilustrada pela Figura 16. Os indivíduos mais bem avaliados em cada geração do processo evolutivo são listados na Tabela 2 e ilustrados na Figura 16.

Em seguida, o algoritmo evolutivo é novamente executado, considerando a população inicial ilustrada pela Figura 17. Os indivíduos mais bem avaliados em cada geração desse processo evolutivo são listados na Tabela 3 e ilustrados na Figura 17.

Geração Inicial		Gera	ação 1	Gera	ação 2	Geração 3		Geração 4	
x	$\mathbf{f}_{\mathbf{aval}}$	x	$\mathbf{f}_{\mathbf{aval}}$	x	$\mathbf{f}_{\mathbf{aval}}$	x	$\mathbf{f}_{\mathbf{aval}}$	x	$\mathbf{f}_{\mathbf{aval}}$
0,50	$5,\!88$	4,84	$19,\!82$	5,08	19,96	4,99	20,00	5,00	20,00
1,00	$9,\!64$	5,37	19,08	$5,\!14$	19,87	4,98	20,00	4,99	20,00
1,50	$10,\!35$	$4,\!61$	$18,\!98$	4,84	$19,\!82$	4,97	$19,\!99$	4,99	20,00
2,00	8,82	4,36	$17,\!38$	4,81	19,75	5,04	$19,\!99$	4,98	20,00
2,50	7,07	$5,\!80$	16,07	5,19	19,75	5,08	19,96	4,98	20,00
8,00	$^{8,82}$	6,08	$13,\!52$	$5,\!19$	19,75	4,89	19,92	4,97	19,99
$^{8,25}$	9,75	6,10	$13,\!33$	5,24	$19,\!61$	4,88	$19,\!90$	4,97	$19,\!99$
8,75	10,36	$6,\!11$	$13,\!24$	4,74	$19,\!54$	$5,\!12$	$19,\!90$	5,04	$19,\!99$
9,19	$^{8,55}$	6,12	$13,\!14$	$5,\!28$	19,47	5,12	$19,\!90$	5,04	$19,\!99$
9,75	3,09	3,77	$12,\!13$	$4,\!62$	$19,\!03$	$5,\!14$	$19,\!87$	5,04	$19,\!99$
Média	8,23		$15,\!67$		$19,\!65$		$19,\!94$		$19,\!99$
Máximo	10,36		19,82		19,96		20,00		20,00
$\Delta f$	$2,\!13$		4,15		0,31		0,06		0,001

Tabela 2 – Resultados da aplicação - primeira condição inicial

Fonte: autor

Resolvendo o problema proposto através da execução do algoritmo evolutivo, verificase que os máximos locais são evitados. Isso é possível porque, ao longo das gerações, os



Figura 16 – Gerações do algoritmo de EE considerando a primeira condição inicial Fonte: autor



Figura 17 – Gerações do algoritmo de EE considerando a segunda condição inicial Fonte: autor

Geração Inicial		Gera	ação 1	Gera	ação 2	Geração 3		Geração 4	
x	$\mathbf{f}_{\mathbf{aval}}$	x	$\mathbf{f}_{\mathbf{aval}}$	x	$\mathbf{f}_{\mathbf{aval}}$	x	$\mathbf{f}_{\mathbf{aval}}$	x	$\mathbf{f}_{\mathbf{aval}}$
0,20	$2,\!49$	5,06	$19,\!98$	5,06	$19,\!98$	4,99	20,00	4,99	20,00
0,50	$5,\!88$	$^{5,27}$	19,50	5,10	19,93	4,96	$19,\!99$	4,99	20,00
0,98	9,54	$5,\!80$	16,07	5,23	$19,\!64$	5,06	19,98	4,99	20,00
1,20	10,28	$6,\!38$	$10,\!80$	4,73	19,50	5,06	19,98	4,98	20,00
1,50	$10,\!35$	1,35	$10,\!44$	5,27	19,50	5,06	19,98	4,98	20,00
1,70	9,91	$1,\!30$	10,41	$5,\!39$	18,98	5,08	19,96	4,98	20,00
1,92	$9,\!14$	1,29	$10,\!40$	4,49	$18,\!29$	5,10	19,93	5,01	20,00
2,25	7,83	$1,\!24$	10,35	$5,\!51$	18,29	4,88	$19,\!90$	5,03	$19,\!99$
2,75	6,79	1,50	$10,\!35$	4,34	17,22	5,14	$19,\!87$	4,96	$19,\!99$
3,00	$7,\!14$	$1,\!52$	$10,\!32$	5,71	$16,\!83$	$5,\!14$	$19,\!87$	4,96	$19,\!99$
Média	7,94		12,86		18,82		19,05		19,99
Máximo	10,35		19,98		$19,\!98$		20,00		20,00
$\Delta f$	2,42		$7,\!12$		$1,\!16$		$0,\!95$		0,003

Tabela 3 – Resultados da aplicação - segunda condição inicial

#### Fonte: autor

indivíduos apresentam diversidade de características, permitindo avaliar as diversas possibilidades de soluções ao longo do espaço de buscas. Ao longo das gerações, os indivíduos, que representam o valor de x, tendem a convergir para o máximo global da função, que ocorre em x = 5.

Repetindo o procedimento considerando uma distribuição não-uniforme dos indivíduos iniciais, verifica-se que o algoritmo converge para a solução esperada, apesar da condição particular dos indivíduos iniciais ao longo do espaço de buscas.

## 3.4.2 Aplicação ao problema de Localização de Faltas

## 3.4.2.1 Caracterização do problema

Tome-se um alimentador de média-tensão hipotético ilustrado pela Figura 18. Todos os trechos são trifásicos e a soma dos seus comprimentos é 80 km. Ao longo do alimentador, existem cargas trifásicas representando os transformadores MT/BT de distribuição. Em condição normal de operação, a corrente no início do alimentador é de 55,72 A.

Supondo um curto-circuito fase-terra, na fase A, com resistência de falta de 10  $\Omega$ , no ponto indicado por um X vermelho na Figura 18, um relé de proteção associado ao disjuntor DJ registra os fasores de tensão e corrente durante o evento de curto-circuito. Um sensor de corrente, identificado por SR na figura, detecta a passagem da corrente de curto-circuito.

A metodologia de localização de faltas proposta por este trabalho é executada para localizar a falta, considerando as medições dos fasores de tensão e de corrente no início do alimentador descritas na Tabela 4. Considera-se também que o sensor SR detecta a passagem da corrente de falta. As configurações selecionadas para o algoritmo de Estratégia Evolutiva são descritas a seguir.

- □ Número máximo de indivíduos por geração: 10
- $\hfill \Box$ Filhos, por indivíduo, na mutação: 6
- $\Box$  Probabilidade de mutação  $(p_m)$ : 0,90
- $\Box$  Probabilidade de cruzamento ( $p_c$ ): 0,40
- $\square\,$ Máxima resistência de falta: 100 $\Omega\,$
- $\square$  Critério de parada:  $\Delta f = f_{aval}^{m\acute{e}d} f_{aval}^{m\acute{n}} < \Delta f_{min}, \ {\rm com} \ \Delta f_{min} = 1$



Figura 18 – Rede elétrica considerada para a aplicação Fonte: autor

A função de avaliação de um indivíduo i é calculada segundo a expressão da Equação 20a. Nessa expressão, os desvios de tensões  $\epsilon_V^i$  e de correntes  $\epsilon_I^i$  são calculados através das Equações 20b e 20c, respectivamente, f é o índice de fase (f = 1, 2, 3) e são adotados os pesos  $K_V = 1$  e  $K_I = 1$ .

$$f_{aval}^{i} = \frac{K_V \cdot \epsilon_V^i + K_I \cdot \epsilon_I^i}{K_V + K_I}$$
(20a)

$$\epsilon_V^i = \left(\sqrt{\sum_{f=1}^3 \left( |\dot{V}_{calc_j}^f| - |\dot{V}_{med_j}^f| \right)^2} \right) / 3 \tag{20b}$$

$$\epsilon_I^i = \left(\sqrt{\sum_{f=1}^3 \left(|\dot{I}_{calc_j}^f| - |\dot{I}_{med_j}^f|\right)^2}\right)/3 \tag{20c}$$

Fase	Tensões	Correntes
А	$5669, 65 \angle -34, 49 \text{ V}$	$179,76\angle -68,38$ A
В	$7976, 27 \angle -154, 40 \text{ V}$	$60, 33 \angle -164, 47$ A
С	$7582, 45 \angle 91, 63 \ \mathrm{V}$	$57,03\angle 89,20$ A

Tabela 4 – Medições consideradas

## 3.4.2.2 Resultados

As gerações do processo evolutivo são ilustradas pela Figura 19, em que os indivíduos nas cores amarela, verde, azul e roxa representam as gerações 1, 2, 3 e 4 respectivamente. Os indivíduos da geração 5 não constam da figura porque se encontram muito próximos do local efetivo da falta. Os detalhes do processo são ilustrados pelas Tabelas 5 e 6, que apresentam a posição, a resistência de falta e a função de avaliação dos indivíduos pais das gerações de 1 a 5. O primeiro parâmetro é dado em termos das barras extremas e um valor porcentual em relação à barra inicial. Por exemplo, 13-14 (21,7 %) representa uma solução no trecho entre as barras 13 e 14, à distância de 21,7 % da barra 13.

Nota-se que, na primeira geração, os indivíduos representam soluções ao longo da ramificação que se inicia no sensor, apresentando resistência de falta entre 3 e 27  $\Omega$ , valor médio de 14  $\Omega$  e desvio-padrão de 9,24  $\Omega$ . O melhor indivíduo (menores desvios) tem função de avaliação de 28,67. Na segunda geração, os indivíduos estão menos espalhados ao longo da área de busca, com resistências de falta entre 3 e 14,5  $\Omega$ , valor médio e desvio-padrão de 8,97 e 3,79  $\Omega$ , respectivamente. Nessa geração, a menor função de avaliação é 6,67.

Na terceira geração, os indivíduos se concentram nos trechos adjacentes ao local da falta (12-13 e 13-14), com resistências de falta entre 6,2 e 12,2  $\Omega$ , média e desvio-padrão de 9,52 e 1,85  $\Omega$ , respectivamente. A menor função de avaliação é 3,22. Na quarta geração, todos os indivíduos se situam no trecho 13-14, muito próximos do local efetivo da falta, com resistências de falta apresentando média de 9,55  $\Omega$  e desvio-padrão de 0,64  $\Omega$ , sendo que o menor valor da função de avaliação é 2,53. Por fim, a quinta geração apresenta média de função de avaliação de 2,96, sendo 2,53 a função de avaliação do melhor indivíduo. A diferença entre esses valores é de 0,43, menor que o diferença mínima de 1 pré-configurada, satisfazendo assim a condição de parada.

O algoritmo evolutivo percorre o espaço de buscas, avaliando diversas combinações envolvendo os parâmetros posição e resistência de falta, representados por variáveis reais em intervalos contínuos. Em apenas 5 gerações, os indivíduos já se encontram muito próximos do local efetivo da falta, com resistência de falta muito próxima do valor efetivo de 10  $\Omega$  e com valores de função de avaliação bem baixos.

Fonte: autor

Gera	ıção 1		Geração 2				
Posição	$R_f(\Omega)$	$f_{aval}$	Posição	$R_f(\Omega)$	$f_{aval}$		
14-15 (30 %)	3	$28,\!67$	13-14 (25,1 %)	8,70	$6,\!67$		
13-14 (21,6 %)	14	50,12	12-13 (74,2 %)	10,5	18,23		
15-16 (1,4 %)	3	$59,\!42$	13-14 (26,0 %)	11,4	25,4		
14-15 (20,4 %)	10	$65,\!55$	14-15 (30,0 %)	3	$28,\!67$		
4-11 (5,2 %)	25	$74,\!82$	$13-14\ (70,3\ \%)$	$^{9,1}$	28,85		
14-15 (78,7 %)	8	80,16	13-14 (39,4 %)	$5,\!8$	30,31		
12-13 (30,3 %)	8	$84,\!45$	14-15 (38,1 %)	$3,\!8$	32,57		
13-14 (68,3 %)	16	$91,\!93$	13-14 (7,4 %)	13,1	$32,\!82$		
11-12 (45,4 %)	26	99,72	11-12 (89,5 %)	$14,\!5$	34,1		
11-12 (11,4 %)	27	99,76	12-13 (59,4 %)	$9,\!80$	$37,\!52$		
Média		73,46			27,51		
Mínimo		$28,\!67$			$6,\!67$		
$\Delta f$		$44,\!79$			$20,\!84$		

Tabela 5 – Processo evolutivo - Gerações 1 e 2

Fonte: autor

Tabela 6 – Processo evolutivo - Gerações 3, 4 e 5

Geração 3			Gera	ção 4		Geração 5		
Posição	$R_f (\Omega)$	$f_{aval}$	Posição	$R_f(\Omega)$	$f_{aval}$	Posição	$R_f (\Omega)$	$f_{aval}$
$\begin{array}{c} \hline 13-14 \ (21,7 \ \%) \\ 13-14 \ (28,8 \ \%) \\ 13-14 \ (25,1 \ \%) \\ 13-14 \ (54,1 \ \%) \\ 13-14 \ (2,2 \ \%) \\ 13-14 \ (34,7 \ \%) \\ 12-13 \ (74,2 \ \%) \\ 13-14 \ (64,2 \ \%) \\ 12-13 \ (96,3 \ \%) \end{array}$	9,58,77,411,49,611 $6,212,2$	3,22 5,33 6,67 10,66 11,52 12 13,61 15,42 17,51	$\begin{array}{c} 13\text{-}14\ (6,2\ \%)\\ 13\text{-}14\ (2,2\ \%)\\ 13\text{-}14\ (21,7\ \%)\\ 13\text{-}14\ (19,3\ \%)\\ 13\text{-}14\ (13,4\ \%)\\ 13\text{-}14\ (26,9\ \%)\\ 13\text{-}14\ (24,1\ \%)\\ 13\text{-}14\ (24,1\ \%)\\ 13\text{-}14\ (16,8\ \%)\\ 13\text{-}14\ (28\ 8\ \%)\\ \end{array}$	$ \begin{array}{c} 10\\ 10,6\\ 9,5\\ 9,7\\ 10,1\\ 9,2\\ 8,9\\ 10\\ 8.7 \end{array} $	2,532,633,223,463,564,074,744,915,33	$\begin{array}{c} 13-14 \ (6,2 \ \%) \\ 13-14 \ (2,2 \ \%) \\ 13-14 \ (6,5 \ \%) \\ 13-14 \ (21,2 \ \%) \\ 13-14 \ (22,1 \ \%) \\ 13-14 \ (12,1 \ \%) \\ 13-14 \ (17,4 \ \%) \\ 13-14 \ (17,4 \ \%) \\ 13-14 \ (22,1 \ \%) \\ 13-14 \ (22,1 \ \%) \\ 13-14 \ (20,4 \ \%) \end{array}$	9,9910,5910,419,489,439,789,839,839,489,63	2,53 2,62 2,65 2,76 2,95 3,1 3,12 3,17 3,24
12 - 13 (74, 2%)	10,5	18,23	13-14 (26,1 %)	8,8	5,35	13-14 (18,8 %)	9,77	3,44
$egin{array}{c} \mathbf{M} egin{array}{c} \mathbf{M} egin{a$		$11,42 \\ 3,22 \\ 8,20$			$3,98 \\ 2,53 \\ 1,45$			$2,96 \\ 2,53 \\ 0,43$

Fonte: autor



Figura 19 – Indivíduos ao longo das gerações Fonte: autor

## Capítulo 4

## Metodologia

## 4.1 Considerações iniciais

Este capítulo se destina à apresentação da metodologia de localização de faltas proposta, que é esquematizada de forma geral pela Figura 20. Nessa figura, são representadas as três principais etapas da metodologia: recepção de dados, processamentos intermediários e a localização de falta efetivamente.

Na etapa de recepção de dados, a metodologia recebe os dados oriundos dos sistemas corporativos - Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA), Metering Data Management (MDM), Geographic Information System (GIS) - e dos equipamentos de campo (sensores e relés de equipamentos de proteção). Em seguida, a etapa de processamentos intermediários contempla a determinação da área de busca e a classificação do defeito. Por fim, executa-se a localização da falta. Ao longo dos itens deste capítulo, essas etapas são apresentadas detalhadamente.

A seção 4.2 especifica os dados necessários para a localização de falta. Em seguida, a seção 4.3 apresenta a determinação da área de busca da falta. Depois, a seção 4.4 propõe um método para determinar as fases afetadas pelo defeito e, por fim, a seção 4.5 descreve o método de Localização da Falta através de um algoritmo evolutivo.



Figura 20 – Diagrama da metodologia Fonte: autor

## 4.2 Entrada de dados para a Localização de Faltas

## 4.2.1 Integração de sistemas corporativos

Em ambiente corporativo da distribuidora de energia, são usados sistemas distintos para o gerenciamento dos mais variados tipos de informação. Dentre esses sistemas, podese listar:

- SCADA contém informações constantemente atualizadas acerca de diversos equipamentos monitorados em campo, como dispositivos de automação, de proteção e sensoriamento.
- Sistema de Proteção permite ajustar parâmetros de proteção e solicitar oscilografias de tensões e correntes registradas pelos relés.
- □ Gerenciamento de Dados de Medição (MDM) reúne dados de consumo provenientes de medidores eletrônicos e inteligentes. No caso de medidores inteligentes, contém informações adicionais, como alarmes informando interrupção do fornecimento.
- Sistema GIS contém informações de cadastro georreferenciado, subsidiando a modelagem digital da rede elétrica.
- □ Sistema de Gerenciamento de Ocorrências (OMS) registra problemas no fornecimento de energia, incluindo os estados de chaves não monitoradas remotamente.

Esses sistemas reúnem grandes volumes de informações de alta relevância, porém apresentam limitações e entraves quanto ao intercâmbio de dados para sistemas terceiros. Os esforços para tornar as redes mais inteligentes passam pela integração desses sistemas corporativos, a qual permite que um sistema DMS utilize informações e serviços dos mais variados sistemas para implementação de funcionalidades como a Localização de Faltas.

Este trabalho considera a existência de um ambiente integrado, fornecendo insumos de parâmetros e medições dos diversos sistemas citados para a funcionalidade de Localização da Faltas. Os seguintes dados são necessários:

- Cadastro georreferenciado dos elementos de rede. Dentre eles, citam-se: trechos, chaves, cargas, transformadores de distribuição. A partir desses dados, que são provenientes do sistema GIS, é possível criar e atualizar o modelo digital dos alimentadores analisados.
- Alarmes de atuação de um ou mais equipamentos de proteção. Esses alarmes são provenientes do sistema SCADA e inicializam a execução da metodologia de localização da falta.
- □ Alarmes de medidores inteligentes, disponíveis no MDM, indicando ausência de tensão e, portanto, interrupção do fornecimento de energia aos consumidores.
- Oscilografias de tensões e correntes registradas por relés de disjuntores e religadoras. Com base nesses registros, disponibilizados pelo Sistema de Proteção, determina-se o intante da falta e estimam-se os fasores de tensões e correntes nesse instante.
- □ Alarmes sobrecorrente ou falta permanente, emitidos por sensores de corrente e disponibilizados pelo sistema SCADA.

#### 4.2.2 Hipóteses e considerações

É necessário ressaltar que algumas hipóteses serão consideradas neste trabalho com o objetivo de simplificar os procedimentos e dar especial foco à utilização de informações obtidas em ambiente integrado para a localização de defeitos.

#### 4.2.2.1 Modelagem da rede elétrica

As simulações para cálculos elétricos são baseadas em modelo digital previamente extraído do sistema GIS. Como será descrito posteriormente, os modelos de redes elétricas serão convertidos para o *software* OpenDSS (EPRI (Electric Power Research Institute), 2015), simulador de redes elétricas, mantido pelo EPRI. Nele são considerados trechos (baseados em parâmetros de arranjos de cabos), barras (denominação para os limites dos trechos), transformadores (MT/BT, de média tensão e de subestação), reguladores de tap fixo, bancos de capacitores, cargas (modelos de potência constante, impedância constante e corrente constante), suprimento (equivalente elétrico à montante da subestação), dentre outros.

#### 4.2.2.2 Blocos de trechos

Neste trabalho, considera-se o conceito de blocos de trechos, que representam conjuntos de trechos e barras adjacentes, delimitados por dispositivos de proteção ou seccionamento. Esse conceito permite auxiliar na referência às diversas regiões de um alimentador e também viabiliza os algoritmos de busca por locais e equipamentos de um alimentador.

No exemplo da Figura 21, as barras e os trechos à jusante do fusível F5 formam o Bloco 1. As barras e os trechos delimitados pela religadora RE e pelos fusíveis F2 e F3 constituem o Bloco 2.

#### 4.2.2.3 Alarmes de Last Gasp

Os medidores inteligentes, associados a infraestruturas de comunicação AMI (*Automatic Metering Infrastructure*), podem emitir alarmes de interrupção do fornecimento. Em



Figura 21 – Esquema de blocos de trechos Fonte: autor

geral, essa é uma funcionalidade relativa à camada de rede do seu módulo de comunicação de rádio. A ausência de tensão nos seus terminais gera uma única mensagem de *Last Gasp*, ou "Último Suspiro", informando a rede de comunicação sobre a desenergização do medidor.

Neste trabalho, os consumidores de uma determinada rede de baixa tensão são representados por uma carga equivalente conectada ao secundário do seu transformador de distribuição. Caso os medidores inteligentes dos consumidores detectem ausência de tensão, considera-se um único alarme de "Last Gasp", que é associado ao respectivo transformador de distribuição, indicando a emissão desse alarme pelos medidores dos consumidores daquela rede de baixa tensão. Sendo assim, a informação do tipo "Last Gasp" estará sempre associada a uma barra de média tensão.

#### 4.2.2.4 Sensores inteligentes

Os sensores inteligentes de média tensão indicam os módulos das correntes por fase em um determinado trecho do alimentador. Também fornecem os valores eficazes das correntes de falta e permitem identificar as fases afetadas.

Conforme ilustrado pela revisão bibliográfica, trabalhos apontam que os sensores inteligentes de média tensão trazem benefícios para a operação das redes elétricas. A estimação de estados do sistema pode ser feito de modo mais preciso, sem utilizar valores estatísticos e hipóteses simplificadoras. A informação de passagem de corrente de falta restringe a área de busca da falta aos blocos à jusante do sensor.

Neste trabalho, os sensores indicam apenas a passagem ou não de corrente de curtocircuito. Assim, eles fornecem um dado binário: sensibilizado ou não sensibilizado.

#### 4.2.2.5 Medições

A metodologia proposta por este trabalho considera fasores de tensões e de correntes relativos ao instante da falta. Esses fasores são obtidos a partir de registros de oscilografias das respectivas grandezas, contendo o instante do curto-circuito. Eles podem ser registradas por medidores de qualidade instalados ao longo do alimentador e por relés associados a chaves de proteção como disjuntores e religadoras.

#### 4.2.3 Obtenção dos dados

O sistema proposto considera a disponibilização dos dados e das medições através de arquivos estruturados, a fim de padronizar esse intercâmbio. Em ambiente corporativo integrado via barramento de interoperabilidade, por exemplo, essas informações podem ser obtidas segundo padrões como XML (usualmente utilizado para *Web Services* do tipo SOAP) e JSON (usualmente utilizado para *Web Services* do tipo REST).

Neste trabalho, os dados serão obtidos a partir de arquivos no padrão INI, que contém seções e campos, permitindo uma organização simples das informações. Arquivos segundo esse padrão podem ser facilmente lidos e escritos a partir de pacotes das diferentes linguagens de programação.

Os arquivos no formato INI para obtenção dos dados são: **Protecao.ini**, **Sensores.ini**, **LastGasp.ini** e **Medicoes.ini**. A Figura 22 exemplifica um conjunto desses arquivos acerca de um evento de curto-circuito.

O conteúdo desses arquivos é descrito da seguinte forma:

#### 1. Protecao.ini

- INFO Armazena o número de equipamentos de proteção.
- □ TIME Contém a estampa de tempo do evento registrado.
- $\hfill\square$  Eqpto<br/>Prot[i]- Lista dos códigos dos equipamentos de proteção que atuaram, com<br/>  $i=1,2,3,\ldots$

#### 2. Sensores.ini

- INFO Armazena o número de sensores.
- □ TIME Contém a estampa de tempo do evento registrado.
- □ Sensor[i] Contém os códigos dos trechos associados ao sensor e se ele foi sensibilizado, com i = 1, 2, 3, ...

#### 3. LastGasp.ini

- INFO Armazena o número de barras de média tensão com Last Gasp associado.
- $\hfill\square$  TIME Contém a estampa de tempo do evento registrado.
- $\hfill\square$ LastGasp[i] Contém os códigos das barras de média tensão com Last Gasp associado, com  $i=1,2,3,\ldots$

#### 4. Medicoes.ini

- INFO Armazena a quantidade de medições de tensão ou corrente.
- □ TIME Contém a estampa de tempo do evento registrado.
- $\hfill\square$ Barra Med<br/>PreFalta[i] - Contém o código da barra com medição de tensão na condição pré-falta, com <br/>  $i=1,2,3,\ldots$
- $\hfill Trecho$  $MedPreFalta[i] - Contém o código do trecho com medição de corrente na condição pré-falta, com <br/> <math display="inline">i=1,2,3,\ldots$



Figura 22 – Processo de obtenção dos dados Fonte: autor

- $\hfill\square$ Barra MedFalta<br/>[i]- Contém o código da barra com medição de tensão durante a falta, com <br/>  $i=1,2,3,\ldots$
- $\square$ Trecho<br/>MedFalta[i] Contém o código do trecho com medição de corrente durante a falta, com <br/>  $i=1,2,3,\ldots$

A Figura 23 esquematiza o processo de obtenção dos dados através dos arquivos INI numerados de 1 a 4, que funcionam como insumo para a metodologia de Localização de Faltas.



Figura 23 – Esquema da obtenção de dados para a Localização de Faltas Fonte: autor

# 4.3 Determinação da área de busca

#### 4.3.1 Definição dos blocos

O modelo digital da rede elétrica investigada contém objetos representando trechos, barras, cargas, dentre outros equipamentos. Foi associado a este modelo um conjunto de dados de blocos elétricos. Conforme item anterior, os blocos são conjuntos de trechos e barras que estão situados entre dispositivos de proteção e seccionamento. A divisão da rede em blocos facilita a elaboração de algoritmos de busca e varredura da rede.

#### 4.3.2 Determinação da área de busca

A metodologia não se restringe a um determinado tipo de insumo de dados. Ao invés disso, considera todos os possíveis insumos listados a seguir, conforme apresentado no item 4.2.3. Com base nesses insumos, a área de busca do defeito é determinada. Quanto mais insumos de dados são considerados, menor é a área de busca determinada.

- □ Lista de barras com *Last Gasp* associado;
- □ Lista de sensores sensibilizados;
- Lista de dispositivos de proteção supervisionados;

Cada grupo de informações listado acima pode apontar para um conjunto de blocos como área de busca candidata. Essa área tem extensão como função da topologia e da alocação dos respectivos dispositivos de campo. A área de busca efetiva é a área de busca candidata com o menor número de blocos.

A seguir, são analisadas duas situações de utilização dos insumos de dados para Localização de Faltas. Na Situação 1, considera-se um defeito à jusante de um fusível, que não é monitorado pelo sistema SCADA. Na Situação 2, considera-se um defeito que sensibiliza uma chave religadora, que é monitorada pelo sistema SCADA. Em função da alocação dos equipamentos de proteção, sensores inteligentes e existência de medidores inteligentes com a funcionalidade de *Last Gasp*, outras combinações de insumos de dados são possíveis. Independentemente da combinação, as áreas candidatas de busca são confrontadas, sendo adotada aquela que possuir menor número de blocos, o que facilita sobremaneira a posterior pesquisa de localização e da resistência de falta.

#### 4.3.2.1 Situação 1

Quando ocorre um curto-circuito à jusante de um fusível, nenhum equipamento de proteção supervisionado atua. Um exemplo desse caso é ilustrado pela Figura 24, em que os medidores inteligentes dos consumidores afetados - nós em vermelho - detectaram falta de tensão. Além disso, alguns sensores foram sensibilizados pela passagem de corrente de defeito. O sensor destacado (em verde) foi o sensor mais à jusante a ser sensibilizado pela corrente de defeito.



Figura 24 – Defeito à jusante de chave de base fusível Fonte: autor

O sensor destacado define a área A1 (Blocos 8, 9, 10 e 11) como área candidata de busca. Por sua vez, as informações de *Last Gasp* indicam a área do Bloco 10 como área candidata de busca. Como a área do Bloco 10 tem número menor de blocos que A1 e está contida em A1, a área do Bloco 10 é efetivamente considerada a área de busca.

#### 4.3.2.2 Situação 2

Um defeito à jusante de uma chave religadora, porém à montante de uma chave de base fusível, faz com que a primeira atue, sendo a informação dessa atuação enviada ao sistema SCADA. Os dados dos sensores também podem auxiliar a determinação da área de busca.

Com exemplo dessa situação, considere-se a Figura 25, que ilustra um defeito em um dos trechos do bloco 8, indicado com um "X" vermelho. A atuação da chave religadora **RE** estabelece a área **A2** (Blocos 5 ao 11) como área de busca candidata. O sensor mais à jusante que foi sensibilizado (em destaque verde) indica uma área de busca candidata **A1** (Blocos 8 ao 11). Como a área **A1** tem menos blocos que a área **A2** e **A1** está contida em **A2**, a área de busca efetivamente considerada é **A1**.



Figura 25 – Defeito à jusante de chave religadora Fonte: autor

# 4.4 Determinação das fases afetadas

#### 4.4.1 Introdução

Antes de proceder com o refinamento da localização da falta, é importante identificar as fases envolvidas e determinar o tipo de falta que será investigada. Esse conhecimento prévio faz com que os cálculos posteriores tenham apenas a posição e a resistência de falta como incógnitas.

#### 4.4.2 Hipóteses consideradas

Este trabalho assume algumas hipóteses para a etapa da determinação das fases afetadas. Primeiramente, parte-se do pressuposto de que os defeitos a serem investigados ocorrem na média tensão. Os impactos nos indicadores de qualidade do serviço são maiores quando o defeito ocorre na média tensão, já que afeta um número maior de consumidores. Porém, as faltas na baixa tensão poderiam ser localizadas, desde que se adotassem procedimentos adicionais a partir dos insumos de dados.

#### 4.4.3 Método para determinação das fases afetadas

A partir das hipóteses do item anterior, conclui-se que as correntes de fase medidas na saída do alimentador correspondem às próprias correntes de defeito. Alguns parâmetros precisam ser definidos, com  $\alpha = 1 \angle 120^{\circ}$ :

□ Valor médio de corrente de defeito

Com os módulos das correntes, por fase, do defeito, calcula-se um valor médio:

$$I_{med} = \frac{|\dot{I}_{a}^{falta}| + |\dot{I}_{b}^{falta}| + |\dot{I}_{c}^{falta}|}{3}$$
(21)

Desvio porcentual em relação à média

Para cada corrente de fase, calcula-se o seu desvio, porcentual, em relação ao valor médio  $I_{med}$ :

$$dI_a = 100 \cdot \frac{|\dot{I}_a^{falta}| - I_{med}}{I_{med}}$$
(22)

$$dI_b = 100 \cdot \frac{|\dot{I}_b^{falta}| - I_{med}}{I_{med}}$$
(23)

$$dI_c = 100 \cdot \frac{|I_c^{falta}| - I_{med}}{I_{med}}$$
(24)

□ Sequências zero e positiva da corrente de defeito

$$I_0 = \frac{\dot{I}_a^{falta} + \dot{I}_b^{falta} + \dot{I}_c^{falta}}{3} \tag{25}$$

$$I_1 = \frac{\dot{I}_a^{falta} + \alpha \dot{I}_b^{falta} + \alpha^2 \dot{I}_c^{falta}}{3} \tag{26}$$

A determinação do tipo de falta resulta da verificação das seguintes etapas:

1. Verificação de Defeito Trifásico (3F)

Em um defeito trifásico, ainda que desequilibrado, os módulos das correntes de fase exibem um desvio pequeno, porcentualmente, em relação ao valor médio. Assumese o parâmetro  $max_1$  como o desvio máximo porcentual das correntes de fase para um defeito trifásico. Considera-se, por padrão,  $max_1 = 8,0\%$ . Assim, a lógica para detectar defeito trifásico (*ABC*) é:

Se  $(|dI_a| < max_1 \mathbf{E} |dI_b| < max_1 \mathbf{E} |dI_c| < max_1)$  Então: ABC.

2. Verificação de Defeito Fase-Terra (FT)

Caso a falta não tenha sido classificada em 3F, adota-se o parâmetro  $min_1$  como o mínimo desvio de uma das correntes, em relação ao valor médio, para que seja falta fase-terra (AT, BT ou CT). Considera-se, por padrão,  $min_1 = 40,0\%$ . A lógica para detectar este defeito é:

Se  $(dI_a > 0 \mathbf{E} |dI_a| > min_1 \mathbf{E} dI_b < 0 \mathbf{E} dI_c < 0)$  Então: AT. Senão, se  $(dI_b > 0 \mathbf{E} |dI_b| > min_1 \mathbf{E} dI_a < 0 \mathbf{E} dI_c < 0)$  Então: BT. Senão, se  $(dI_c > 0 \mathbf{E} |dI_c| > min_1 \mathbf{E} dI_a < 0 \mathbf{E} dI_b < 0)$  Então: CT.

3. Verificação de Defeito Dupla-Fase ou Dupla-Fase-Terra (2F ou 2FT)

Caso a falta não tenha sido classificada como 3F nem FT, o algoritmo considera a possibilidade de defeito envolvendo duas fases (2F ou 2FT). Adota-se o parâmetro  $min_2$  como a mínima relação entre a corrente de sequência zero e a de sequência positiva para que o defeito seja classificado como dupla-fase-terra. Por padrão, considera-se  $min_2 = 5\%$ . A lógica para detectar defeito dupla-fase (AB, BC ou AC) ou dupla-fase-terra (ABT, BCT, ACT) é:

Se  $(dI_a > 0 \mathbb{E} dI_b > 0 \mathbb{E} dI_c < 0)$  Então: Se  $|I_0/I_1| > min_2$  Então: ABT. Senão, se  $|I_0/I_1| \le min_2$  Então: AB.

Se 
$$(dI_b > 0 \text{ E } dI_c > 0 \text{ E } dI_a < 0)$$
 Então:  
Se  $|I_0/I_1| > min_2$  Então:  $BCT$ .

Senão, se  $|I_0/I_1| \leq min_2$  Então: BC.

Se  $(dI_a > 0 \ge dI_c > 0 \ge dI_b < 0)$  Então: Se  $|I_0/I_1| > min_2$  Então: ACT. Senão, se  $|I_0/I_1| \le min_2$  Então: AC.

### 4.5 Localização da falta

#### 4.5.1 Estratégia Evolutiva para Localização de Faltas

Neste estágio do algoritmo, são conhecidos: a área de busca e o tipo de falta. Então, o próximo passo é determinar o local da falta dentro da área de busca e a resistência de falta, levando-se em consideração o tipo de falta previamente determinado.

#### 4.5.1.1 Discretização dos trechos da área de busca

O modelo digital da rede elétrica investigada contém os trechos com seus respectivos comprimentos. Não é possível, porém, identificar univocamente um ponto da rede a partir da sua distância em relação à subestação, porque a rede de distribuição é ramificada.

Assim, os trechos da área de busca são discretizados, de modo que cada trecho é representado por um intervalo de números reais. A discretização é descrita a seguir:

- 1. Somam-se os comprimentos dos trechos da área de busca:  $L_{acum} = L_1 + L_2 + ... + L_n$ , sendo n o número de trechos.
- 2. Um trecho *i* fica identificado pelo intervalo real  $[L_{acum}^{i-1}, L_{acum}^{i}]$ , em que  $L_{acum}^{i-1} = L_1 + L_2 + \ldots + L_{i-1} \in L_{acum}^i = L_{acum}^{i-1} + L_i$ .
- 3. Os limites  $L_{acum}^{i-1}$  e  $L_{acum}^i$  são normalizados em relação a  $L_{acum}$ , de modo que o trecho *i* fica identificado pelo intervalo real  $[l_{acum}^{i-1}, l_{acum}^i]$ , onde  $l_{acum}^{i-1} = 100 \cdot \frac{L_{acum}^{i-1}}{L_{acum}}$  e  $l_{acum}^i = 100 \cdot \frac{L_{acum}^i}{L_{acum}}$ .

Para ilustração, tome-se o circuito esquematizado pela Figura 26, que destaca a Área de Busca e os blocos em seu interior. Os trechos desta área são discretizados, de forma que cada trecho pode ser representado pelos comprimentos acumulados, normalizados em relação ao comprimento acumulado máximo. O trecho destacado (em vermelho), por exemplo, é representado pelo intervalo [65, 18; 73, 21].



Figura 26 – Exemplo de discretização dos trechos da área de busca Fonte: autor

#### 4.5.1.2 Geração dos indivíduos iniciais

A formação da geração inicial dos indivíduos da Estratégia Evolutiva se baseia em alguns parâmetros pré-definidos: o número inicial de indivíduos  $N_{ind}^0$  e os valores iniciais de desvio-padrão:  $(\sigma_x^0, \sigma_{R_f}^0)$ .

Para um indivíduo, o parâmetro x (localização em %) é obtido de um gerador aleatório com distribuição uniforme entre 0 e 100. O parâmetro  $R_f$ , a resistência de falta, é sorteada a partir de uma distribuição uniforme entre 0 e  $R_f^{max}$ . Os respectivos desvios-padrão iniciais ( $\sigma_x^0, \sigma_{R_f}^0$ ) são fixados como por exemplo:  $\sigma_x^0 = 0$  e  $\sigma_{R_f}^0 = 0, 50 * R_f^{max}$ .

#### 4.5.1.3 Avaliação dos indivíduos

Em uma determinada geração, um dado indivíduo i é definido por dois vetores de dados:  $(x^i, R_f^i) \in (\sigma_x^i, \sigma_{R_f}^i)$ . Esse indivíduo é avaliado, a partir das suas características  $(x^i, R_f^i)$ , quanto à sua adaptação ao seu ambiente. Isso é, essa avaliação será tão melhor quanto mais suas características se aproximarem da resolução do problema de Localização da Falta.

Para a avaliação de um indivíduo, primeiramente suas características  $(x^i, R_f^i)$  são convertidas em termos de posição topológica na rede elétrica e da resistência de falta. Considere-se um dado indivíduo  $(x^i = 25, 84; R_f^i = 1, 25)$ , com resistência de falta  $R_f=1,25 \Omega$ , e que  $x^i = 25,84 \%$  seja um ponto do trecho representado por [25, 81; 25, 85].

Na posição do alimentador definida pelo indivíduo i, o algoritmo analisa se é possível haver uma falta do tipo determinado inicialmente. Isso é feito com base na descrição topológica do alimentador, que contém, dentre outros parâmetros, a descrição das fases dos trechos. Se o faseamento naquela posição não comportar a falta, o algoritmo faz a função de avaliação do indivíduo  $f_{aval}^i = -1$ . Se a falta for possível, procede com o teste, passando o ponto exato do alimentador e a resistência de falta. O teste da falta será descrito posteriormente.

O procedimento para teste da falta retorna 2 listas:

- 1. Lista de tensões calculadas nos nós com monitoramento de tensão.
- 2. Lista de correntes calculadas nos trechos com monitoramento de corrente.

Os desvios de tensões  $\epsilon_V^i$  e de correntes  $\epsilon_I^i$  de um indivíduo *i* são calculados segundo as Equações 27, onde  $N_{medV}$  é o número de pontos de medição de tensão e  $N_{medI}$  é o número de pontos de medição de corrente, *f* é o índice de fase (*f* = 1, 2, 3). Os totais de diferenças somadas são  $N_{medTot_V} = 3 \cdot N_{medV}$  e  $N_{medTot_I} = 3 \cdot N_{medI}$ .

$$\epsilon_V^i = \left(\sqrt{\sum_{j=1}^{N_{medV}} \sum_{f=1}^3 \left( |\dot{V}_{calc_j}^f| - |\dot{V}_{med_j}^f| \right)^2} \right) / N_{medTot_V}$$
(27a)

$$\epsilon_I^i = \left( \sqrt{\sum_{j=1}^{N_{medI}} \sum_{f=1}^3 \left( |\dot{I}_{calc_j}^f| - |\dot{I}_{med_j}^f| \right)^2} \right) / N_{medTot_I}$$
(27b)

A partir dos desvios  $\epsilon_V^i$  e  $\epsilon_I^i$ , calcula-se o valor da função de avaliação  $f_{aval}^i$  do indivíduo *i*, através da Equação 28 onde  $K_V$  e  $K_I$  são os pesos para as medições de tensão e corrente, respectivamente.

$$f_{aval}^{i} = \frac{K_{V} \cdot \epsilon_{V}^{i} + K_{I} \cdot \epsilon_{I}^{i}}{K_{V} + K_{I}}$$
(28)

Considerando essa formulação do problema, pretende-se obter um indivíduo com os menores desvios  $\epsilon_V^i \in \epsilon_I^i$ . Ou seja, o objetivo do algoritmo é minimizar a função de avaliação. Se um indivíduo *i* for inválido (posição impossível ou fora dos limites estabelecidos), a ele é atribuído  $f_{aval}^i = -1$ .

Na etapa de seleção dos melhores indivíduos, os inválidos são descartados e os demais são ordenados do melhor para o pior, ou seja, do menor para o maior valor de  $f_{aval}$ . Então são selecionados os melhores indivíduos dessa ordenação, segundo o número máximo de indivíduos por geração. Tanto pais quanto filhos são considerados nessa etapa.

#### 4.5.1.4 Aplicação dos Operadores de Estratégia Evolutiva

#### Operador Mutação

Em uma determinada geração k de indivíduos, um indivíduo i é sujeito ao operador mutação, a depender de uma probabilidade de mutação  $p_m$ , que geralmente é considerada  $p_m = 1, 0$ . Os valores de desvio-padrão  $\sigma_{x_i}^k \in \sigma_{R_{f_i}}^k$ , a serem usados na geração ksão obtidos a partir dos seus respectivos valores durante a geração k-1, segundo as Equações 29, processo denominado "auto-adaptação".

Nessas expressões,  $\tau' = 1/\sqrt{2\beta}$  e  $\tau = 1/\sqrt{2\sqrt{\beta}}$ , sendo que frequentemente se adota  $\beta = 2$ . N(0, 1) é um valor sorteado com distribuição normal de média 0 e desviopadrão unitário. É um valor constante para um determinado indivíduo.  $N_x(0, 1)$  e  $N_{R_f}(0, 1)$  são números aleatórios sorteados segundo distribuição normal de média 0 e desvio-padrão unitário.

$$\sigma_{x_i}^k = \sigma_{x_i}^{k-1} \cdot exp(\tau' \cdot N(0, 1) + \tau \cdot N_x(0, 1))$$
(29a)

$$\sigma_{R_{f_i}}^k = \sigma_{R_{f_i}}^{k-1} \cdot exp(\tau' \cdot N(0, 1) + \tau \cdot N_{R_f}(0, 1))$$
(29b)

Com isso, os parâmetros do novo indivíduo são calculados, segundo as Equações 30.

$$x_i^k = x_i^{k-1} + \sigma_{x_i}^k \cdot N_x(0, 1)$$
(30a)

$$R_{f_i}^k = R_{f_i}^{k-1} + \sigma_{R_f}^k \cdot N_{R_f}(0, 1)$$
(30b)

Após a aplicação do operador mutação aos indivíduos de uma geração k, as idades dos iniciais são comparadas com um valor configurável de idade máxima. Caso sua idade não supere este valor, o indivíduo pode passar à geração k + 1.

Operador Cruzamento

Com os indivíduos pais de uma geração k, são selecionados os pares de indivíduos a sofrerem cruzamento. Para um determinado par, sorteia-se um valor real com distribuição uniforme do intervalo [0, 1], que é comparado à probabilidade de cruzamento  $p_c$ , definida previamente. Caso o valor sorteado pertença ao intervalo  $[0, p_c]$ , o par analisado sofre cruzamento.

Dados o indivíduo 1  $(x_1, R_{f_1})$  e o indivíduo 2  $(x_2, R_{f_2})$ , então o indivíduo resultante desse cruzamento tem seus parâmetros determinados pelas Equações 31. Nessas equações, o parâmetro *a* é um número real sorteado do intervalo [0, 1], a partir de distribuição uniforme.

$$x = a \cdot x_1 + (1 - a) \cdot x_2 \tag{31a}$$

$$R_f = a \cdot R_{f_1} + (1 - a) \cdot R_{f_2} \tag{31b}$$

Procedimento semelhante é aplicado aos desvios-padrão desses indivíduos, conforme as Equações 32.

$$\sigma_x = a \cdot \sigma_{x_1} + (1-a) \cdot \sigma_{x_2} \tag{32a}$$

$$\sigma_{R_f} = a \cdot \sigma_{R_{f_1}} + (1-a) \cdot \sigma_{R_{f_2}} \tag{32b}$$

#### 4.5.2 Cálculo de curto-circuito para avaliação dos indivíduos

#### 4.5.2.1 Descrição geral

Conforme apresentado pelo item 4.5.1, os indivíduos de EE devem ser avaliados quanto à sua adequação à solução do problema. Neste trabalho, o OpenDSS - *software* simulador de redes elétricas - é utilizado para modelar as condições de falta caracterizadas por um determinado indivíduo.

Os equipamentos da rede elétrica são descritos por arquivos de texto segundo o formato DSS os quais são interpretados por esse simulador de redes elétricas. Os modos de funcionamento, a modelagem dos equipamentos e o controle do OpenDSS via aplicação externa são apresentados no apêndice A. Dentre os arquivos DSS que descrevem a rede elétrica, listam-se:

 $\Box$  MasterFile.dss

Arquivo que contém os comandos do *script* principal. São definidos: suprimento, transformador de subestação e a chamada para os demais arquivos DSS.

 $\Box$  lines.dss

Arquivo em que são declarados os objetos de trechos, definidos por um nome, número de fases, barra 1, barra 2, dentre outros.

#### $\Box$ loads.dss

Arquivo em que são declarados os objetos de cargas, definidos por um nome, número de fases, barra de conexão, tensão nominal, modelo de carga e potências.

#### $\hfill\square$ linecodes.dss

Neste arquivo, são declarados os arranjos de trechos, definidos por um nome, uma matriz de resistências por fase e uma matriz de reatâncias por fase.

#### □ capacitores.dss

Este arquivo contém a declaração dos bancos de capacitores instalados no alimentador. Cada equipamento é definido por um nome, barra de conexão, tensão e potência reativa nominal.

#### $\Box$ regtensao.dss

Arquivo declarando os reguladores de tensão - número de fases, barras de conexão, tensões nominais e reatâncias. Neste trabalho, os reguladores de tensão são considerados de tap fixo.

A implementação da metodologia proposta por este trabalho se baseia na leitura e na alteração desses arquivos DSS. Informações estáticas são obtidas antes das simulações, como a topologia e a disposição dos trechos do alimentador, que é feita com base na descrição original da rede elétrica por **lines.dss**. Inicialmente, o arquivo **loads.dss** sofre alteração nas potências das suas cargas, em função do patamar de carga considerado para a simulação. A Figura 27 descreve a estrutura de *software* para os testes de faltas.



Figura 27 – Esquema da estrutura de *software* para testes de faltas Fonte: autor

Dinamicamente, a metodologia executa testes de curto-circuito com determinadas características (posição, resistência de falta). O trecho onde será testada a falta é substituído por dois trechos, conectados entre si por uma barra auxiliar que será o ponto de falta. O circuito elétrico é resolvido pelo simulador e os resultados de cálculos são encaminhados para o algoritmo. Essa sequência de ações é ilustrada pela Figura 28.

#### 4.5.2.2 Inserção da falta

Considere-se um trecho identificado pelo intervalo real [25, 81; 25, 85]. Supondo um teste de falta na posição 25, 82, o trecho é substituído por dois outros trechos auxiliares e uma barra auxiliar, de tal forma que se tenha a situação ilustrada pela Figura 29. Essa substituição se dá através da alteração do arquivo **lines.dss**.



Figura 28 – Sequência de ações para os testes de faltas Fonte: autor



Figura 29 – Processo de inserção da falta em trecho Fonte: autor

O cálculo do comprimento do primeiro trecho auxiliar  $(L_1)$  é feito pela Equação 33. Com esses valores, são gerados os trechos auxiliares com os comprimentos adequados.

$$L_1 = \frac{25,82 - 25,81}{25,85 - 25,81} \cdot L_0 = 0,25L_0 \tag{33}$$

#### 4.5.2.3 Obtenção dos resultados

Com a finalidade de tornar o OpenDSS um motor de cálculo, ou seja, um *software* utilizado sob demanda e apenas para realizar cálculos elétricos, foi desenvolvida a classe **Solver** na aplicação Python, com uma referência para as interfaces do OpenDSS e também com estruturas de listas para armazenar objetos de trechos e de barras.

No início da execução da metodologia, cria-se um objeto *objSolver*, da classe **Solver**, que contém uma lista com os objetos de barras (*objBarra\_1*, ..., *objBarra\_m*) e uma lista com os objetos de trechos (*objTrecho\_1*, ..., *objTrecho\_n*) a serem monitorados. Sempre que uma simulação com o OpenDSS é executada, o *objSolver* recebe as tensões nas barras monitoradas e as correntes nos trechos monitorados, como ilustrado pela Figura 30.



Figura 30 – Objeto para obtenção dos resultados dos testes de faltas Fonte: autor

# Capítulo 5

# Estudos de casos e resultados

# 5.1 Considerações iniciais

Neste capítulo, a metodologia proposta neste trabalho é aplicada para localizar faltas, seguida de análises do seu desempenho em termos gerais e também de análises de sensibilidade. A aplicação da metodologia a casos de faltas simuladas permite analisar a precisão do localizador em função da quantidade de informações acerca dos eventos. Em seguida, a aplicação da metodologia a casos reais de curto-circuito permite analisar as dificuldades para implementação prática, bem como sugerir formas de superar esses desafios.

# 5.2 Estudo aplicado a faltas simuladas

#### 5.2.1 Procedimentos de teste

Para os testes deste estudo, desenvolveu-se neste trabalho um *software* Gerador de Curto-Circuito (GCC). Ele é um *script* em Python que controla o simulador de redes elétricas OpenDSS. O GCC comanda a simulação de uma falta e obtém as informações de interesse para a localização daquela falta, dentre as quais citam-se:

- Tensões nas barras monitoradas;
- $\Box$  Correntes nos trechos monitorados;
- □ Alarmes de falta de tensão em medidores inteligentes;

Essas informações são encaminhadas à Metodologia de Localização de Faltas proposta. Após a execução do algoritmo de LF, compara-se o resultado de localização obtido com aquele efetivamente utilizado para simular a falta, o que permite calcular os desvios de localização e de impedância de falta.

#### 5.2.2 Rede elétrica analisada

Considere-se um alimentador real de média tensão em 13,8 kV, que possui um disjuntor no início e 7 chaves religadoras ao longo de sua extensão. A distância do ponto mais distante em relação à subestação é de 39 km e a soma dos comprimentos de todos os trechos é 214 km. O circuito possui 650 transformadores de distribuição, atendendo 7.092 clientes de baixa tensão e 9 consumidores de média tensão.

A topologia desse alimentador é ilustrada pela Figura 31, cujo detalhe mostra um esquema com os blocos da "Área de Testes", que é a região selecionada para as simulações de curto-circuito. A soma dos comprimentos dos seus trechos é 22 km. Os testes consistem na simulação de faltas nos trechos dos blocos da Área 1 (área bem ramificada) e nos trechos dos blocos da Área 2 (área com poucas ramificações), todos indicados na mesma figura. Os dados de topologia, das cargas e dos equipamentos são reais e os curto-circuitos são simulados. Em seguida, para cada simulação, o local da falta é estimado.



Figura 31 – Alimentador para aplicação dos testes de faltas Fonte: autor

#### 5.2.3 Condições de testes

Os eventos de curto-circuito são analisados segundo três situações de monitoramento do sistema, proporcionados pelos equipamentos ilustrados pela Figura 32. Elas são:

- Situação 1 Tensões e correntes, por fase, no início do alimentador, as correntes nos trechos dos Sensores 1 e 2 e as tensões e correntes na posição da religadora;
- □ Situação 2 Dados da Situação 1, acrescidos de tensões dos Monitores 1 e 2;
- Situação 3 Dados da Situação 2, além de alarmes de ausência de tensão dos medidores de consumidores da "Área de Testes";

Nos testes da Situação 3, são aplicadas faltas em pontos à jusante de fusíveis da "Área de Testes". Nessas situações, o centro de operações não toma conhecimento da atuação da chave fusível, mas recebe os alarmes de falta de tensão (*Last Gasp*) dos medidores associados aos consumidores afetados, indicando a interrupção do fornecimento.



Figura 32 – Indicação dos equipamentos de monitoramento das Situações 1 e 2 Fonte: autor

#### 5.2.4 Configurações da Estratégia Evolutiva

Para os testes apresentados a seguir, são consideradas as seguintes configurações para a Estratégia Evolutiva:

- $\Box$  Número inicial de indivíduos: 40;
- □ Número máximo admissível de indivíduos por geração: 10;
- Operador de mutação: mutação não-correlacionada;
- $\Box$  Probabilidade de mutação:  $P_m = 0.8$ ;

- □ Número máximo admissível de descendentes por indivíduo devido à mutação: 6;
- Operador de cruzamento: características do descendentes são calculadas por média intermediária local;
- $\Box$  Probabilidade de cruzamento:  $P_c = 0.5$ ;
- Operador de seleção: são selecionados os indivíduos mais bem avaliados (menores valores de função de avaliação), considerando pais e filhos;
- $\Box \sigma_x^{inicial} = 15 \text{ m};$
- $\Box \ \sigma_{R_f}^{inicial} = 10 \ \Omega;$
- $\square R_{falta}^{m\acute{a}xima} = 15 \ \Omega;$
- □ Idade máxima por indivíduo: 7 gerações;
- $\Box$  Critério de parada:  $\Delta f = f_{aval}^{med} f_{aval}^{min} < 1;$

#### 5.2.5 Influência da quantidade de informações

A seguir, são apresentados os resultados de testes de localização de faltas realizados segundo as Situações 1, 2 e 3. Para cada situação, tem-se uma falta simulada e o correspondente resultado da sua localização. Indicam-se também a resistência de falta considerada, o número de gerações para a localização (quantificação de tempo) e os erros das estimações de resistência de falta e de localização.

Os testes se distinguem por tipo de falta aplicada, conforme a Tabela 7. Também são apresentados os valores máximos, mínimos, de média e de desvio-padrão acerca dos testes da situação considerada.

Tipo de falta	Descrição
ABC	Trifásica
ABG	Dupla-fase-terra
AB	Dupla-fase
AG	Fase-terra

Tabela 7 – Tipos de faltas

Fonte: autor

#### 5.2.5.1 Situação 1

As posições das faltas trifásicas (**ABC**) simuladas na área de testes são descritas pela Figura 33, e os respectivos resultados de localização são listados na Tabela 8. O valor de  $R_f = 0 \ \Omega$  foi considerado para todos as faltas trifásicas. Para cada simulação, são mostrados o erro de localização em metros e seu valor relativo ao comprimento total da área de testes (22.109 metros).



Figura 33 – Posições de todas as faltas ABC simulados Fonte: autor

Tabela 8 – Resultados para as faltas do tipo ABC - Situação 1

Núm.	Gerações	Tempo de processamento (s)	Erro de $\mathbf{R}_{\mathbf{f}}(\mathbf{\Omega})$	Erro de localização (m)
1	15	29,5	0	$167,44 \ (0,76 \ \%)$
2	26	52,0	0	1793 (8,11 %)
3	12	23,8	0	220,51(1,00%)
4	16	33,5	0	1056 (4,78 %)
5	13	28,3	0	275,71(1,25%)
6	12	22,4	0	2732 (12, 36 %)
7	16	27,7	0	160,03 (0,72 %)
8	11	$21,\!6$	0	$285,31 \ (1,29 \ \%)$
9	11	22,7	0	12,38 (0,06 %)
10	13	27,7	0	$13,45\ (0,06\ \%)$
Média	14,50	29,0	0	671,58 (3,04 %)
D. Padrão	4,23	8,9	0	868,54 (3,93 %)

Fonte: autor

As localizações com erros acima de 1.000 metros são indicados sobre a representação topológica da área de testes, conforme a Figura 34. Os defeitos 2 e 4 têm como resultados de localização os pontos 2a e 4a respectivamente. Executando a metodologia de

localização de faltas algumas vezes, verifica-se que as posições 2b e 2c (vide Figura 34) são outros possíveis resultados de localização.

Para a localização da falta 4, nota-se que o algoritmo converge para uma condição cujos parâmetros (local da falta e resistência de falta) divergem dos valores efetivos, gerando a localização 4a. Porém, executando a metodologia algumas outras vezes, nota-se que as posições 4b e 4c (vide Figura 34) também são soluções obtidas.



Figura 34 – Localizações de faltas ABC com erros maiores que 1.000 m Fonte: autor

As posições das faltas dupla-fase-terra (**ABG**) simuladas na área de testes são ilustradas na Figura 35, e os respectivos resultados de localização são listados na Tabela 9. Para cada simulação,  $R_f$  é o valor da resistência da falta simulada. São mostrados o número de gerações (tempo para localizar a falta), o erro de localização em metros e seu valor relativo ao comprimento total da área de testes (22.109 metros).

Na representação da área de testes (Figura 36), são detalhados alguns casos cujos erros de localização superaram 1.300 metros. Eles são os pontos 1, 4 e 5, cujos respectivos resultados de localização são os pontos 1a, 4a e 5a. Executando a metodologia de localização de faltas outras vezes, nota-se que os pontos 1b, 1c e 1d também são obtidos como resultados. O ponto 1d está a uma distância de 495 metros do ponto 1, um desvio de 2,23 % do comprimento total da área de busca.

Analogamente, para a localização da falta 4, os pontos 4a e 4b são obtidos como resultados de localização. Verifica-se que 4, 4a e 4b têm distâncias muito próximas em relação ao ponto de referência "Ref.", sendo elas 1.388, 1.314 e 1.270 metros, respectivamente. Assim, as medições nos pontos monitorados são muito próximas para uma mesma falta em qualquer desses três pontos.

Comentário similar pode ser feito para a localização da falta 5. Os pontos 5a, 5b e 5c são possíveis resultados de localização, em que 5b está a 258 metros do ponto 5, representando um desvio de 1,17 % em relação ao comprimento total da área de teste (22.109 metros).

Núm.	$\mathbf{R_f}(\boldsymbol{\Omega})$	Gerações	Tempo de processamento (s)	Erro de $\mathbf{R}_{\mathbf{f}}(\mathbf{\Omega})$	Erro de localização (m)
1	2,75	19	39,8	$0,\!437$	1717,5 (7,77 %)
2	1,9	23	46,1	0,27	1033,24 (4,67 %)
3	0,75	13	27,8	0,03	1043,5 (4,72 %)
4	1,42	13	27,0	$0,\!15$	1589,2 (7,19 %)
5	$^{7,2}$	25	48,8	0,27	$1374,64\ (6,22\ \%)$
6	0,01	23	45,1	$0,\!18$	125,78~(0,57~%)
7	2	21	40,2	0,04	$128,2 \ (0,58 \ \%)$
8	$^{4,5}$	21	44,6	0,03	$112,14 \ (0,51 \ \%)$
9	$^{1,3}$	23	48,0	0,21	1472~(6,66~%)
10	1,25	23	43,1	$0,\!18$	453,4 (2,05 %)
11	0,25	28	53,1	0,07	85,92~(0,39~%)
12	0,25	25	55,4	$0,\!16$	$186,88 \ (0,85 \ \%)$
Mé	dia	$21,\!42$	43,2	$0,\!17$	776,87 (3,51 %)
D. P.	adrão	$4,\!35$	8,7	0,12	628,40 (2,84 %)

Tabela 9 – Resultados de localização de faltas do tipo **ABG** - Situação 1

Fonte: autor

Todas as posições das faltas dupla-fase (**AB**) simuladas na área de testes são descritas pela Figura 37 e os respectivos resultados de localização são listados na Tabela 10. Para cada simulação,  $R_f$  é o valor da resistência da falta simulada. São mostrados o número de gerações (tempo para localizar a falta), o erro de localização em metros e seu valor relativo ao comprimento total da área de testes (22.109 metros).

Foram selecionados alguns resultados cujos erros de localização superaram 1.200 metros. Eles são indicados na Figura 38, que representa a área de testes. Para a localização da falta 5, execuções da metodologia fornecem os pontos 5a, 5b e 5c como resultados de localização. Esses pontos praticamente equidistam do ponto de referência "Ref.": 833, 1040 e 960 metros, respectivamente. Ou seja, as impedâncias equivalentes nesses pontos têm valores muito próximos. Por isso, uma mesma falta em qualquer desses pontos leva a valores de medições muito próximos no ponto de referência.

Uma análise similar pode ser feita na localização da falta **6**. Execuções da metodologia fornecem como resultados de localização os pontos **6a**, **6b** e **6c**, sendo que **6b** é o resultado que mais se aproxima do local efetivo da falta. Para a localização da falta **12**, a metodologia fornece como soluções os pontos **12a** e **12b**, sendo o último muito próximo do local efetivo da falta.



Figura 35 – Posições de todas as faltas ABG simuladas Fonte: autor



Figura 36 – Localizações de faltas ABG com erros maiores que 1.300 m Fonte: autor



Figura 37 – Posições de todos as faltas AB simuladas Fonte: autor

Núm.	$\mathbf{R_f}(\boldsymbol{\Omega})$	Gerações	Tempo de processamento (s)	Erro de $\mathbf{R}_{\mathbf{f}}(\mathbf{\Omega})$	Erro de localização (m)
1	$0,\!5$	21	45,3	0,005	$12,75 \ (0,06 \ \%)$
2	0,01	13	26,9	0,16	436,07 (1,97 %)
3	0,01	24	48,5	0	2,18 (0,01 %)
4	0,01	17	34,3	0,15	63,07 (0,29 %)
5	$^{1,5}$	25	51,2	$0,\!66$	1813,19(8,20%)
6	1	12	23,0	0,05	$1581,31 \ (7,15 \ \%)$
7	0,01	17	32,9	0,11	6,63~(0,03~%)
8	0,01	27	50,8	0,01	59,23~(0,27~%)
9	$1,\!45$	18	35,5	0,01	$97,17 \ (0,44 \ \%)$
10	0,01	26	52,5	0	$85,46 \ (0,39 \ \%)$
11	0,01	30	67,7	0,01	$6,59\ (0,03\ \%)$
12	$^{0,7}$	21	42,5	0,36	1228,8(5,56%)
Mé	dia	20,92	42,6	0,13	449,37 (2,03 %)
D. P.	adrão	$5,\!42$	$12,\!6$	0,19	651,25 (2,95 %)

Tabela 10 – Resultados de localização para as faltas do tipo ${\bf AB}$  - Situação 1

Fonte: autor



Figura 38 – Localizações de faltas  ${\bf AB}$  com erros maiores que 1.200 m Fonte: autor

Os resultados de localização das faltas fase-terra (**AG**), simuladas na área de testes, são listados na Tabela 11. Para cada simulação,  $R_f$  é o valor da resistência da falta simulada. São mostrados o número de gerações (tempo para localizar a falta), o erro de localização em metros e seu valor relativo ao comprimento total da área de testes (22.109 metros).

Na representação da área de testes, a Figura 39 mostra alguns resultados cujos erros de localização superaram 1.500 metros. Como indicado na figura, os pontos  $1, 5 \in 6$ , têm como resultados de localização os pontos  $1a, 5a \in 6a$ , respectivamente.

Para a localização da falta 1, outras execuções da metodologia fornecem como resultado o ponto 1b, que é muito próximo do local efetivo da falta. Analogamente, execuções adicionais do algoritmo fornecem como resultado o ponto 5b, quase coincidente com o local efetivo da falta. Procedendo da mesma forma para a falta 6, o ponto 6b também é obtido como resultado de localização. Esses pontos são aproximadamente equidistantes do ponto de referência "Ref.", como se verifica através da Figura 39.

A Tabela 12 resume, segundo a Situação 1, as informações relativas ao tempo de execução do algoritmo, do erro de resistência de falta e do erro de localização, em metros e relativo ao comprimento total da área de testes.

Núm.	$\mathbf{R_f}(\boldsymbol{\Omega})$	Gerações	Tempo de processamento (m)	Erro de $\mathbf{R}_{\mathbf{f}}(\mathbf{\Omega})$	Erro de localização (m)
1	0,01	25	50,8	0,3	$1890,65 \ (8,55\%)$
2	$^{2,5}$	20	36,7	$0,\!18$	$175,44 \ (0,79\%)$
3	1,25	26	49,3	0,02	19,63(0,09%)
4	3,75	17	33,0	0,12	126,19(0,57%)
5	$^{0,5}$	24	51,7	0,27	1554,29(7,03%)
6	0,75	18	40,1	$0,\!44$	2167,85 (9,81%)
7	$0,\!45$	23	49,0	0,04	1507,3 (6,82%)
8	1,5	18	40,2	0,06	$126,41 \ (0,57\%)$
9	$^{3,2}$	14	27,7	0,06	228,2(1,03%)
10	$7,\!5$	10	19,2	0,03	102,65 (0,46%)
11	12	27	52,2	0	1,9 (0,01%)
12	$^{5,3}$	20	39,1	0,23	242,18(1,10%)
13	1,21	15	30,7	0,03	25,2 (0,11%)
Mé D. P	edia adrão	$19,77 \\ 4,90$	$39,1 \\ 10,3$	$0,14 \\ 0,13$	$\begin{array}{c} 628,30 \ (2,84 \ \%) \\ 785,20 \ (3,55 \ \%) \end{array}$

Tabela 11 – Resultados de localização para as faltas do tipo ${\bf AG}$  - Situação 1

Fonte: autor





Tabela 12 – Resultados de localização - Situação 1

	Gerações	Tempo de processamento (s)	Erro de $\mathbf{R_f}$ $(\Omega)$	Erro de localização (m)
Máximo	30	67,7	$0,\!66$	2732,00 (12,35 %)
Mínimo	10	19,2	0	$1,90 \ (0,01 \ \%)$
Média	19,36	39,1	0,11	629,76~(2,85~%)
Desvio-padrão	$5,\!44$	11,4	$0,\!15$	744,55 $(3,37$ %)

Fonte: autor

#### 5.2.5.2 Situação 2

Conforme mencionado em 5.2.3, a Situação 2 considera medições nos mesmos pontos de monitoramento da Situação 1, acrescidas de medições de monitores nas Áreas 1 e 2. Similarmente à Situação 1, são localizados defeitos dos tipos **ABC**, **ABG**, **AB** e **AG**.

Os resultados de localização dos defeitos **ABC**, simulados na área de testes e segundo a Situação 2 de monitoramento, são listados na Tabela 13. Nesses casos, o valor de resistência de  $R_f = 0 \ \Omega$  é considerado para todos os defeitos trifásicos. Para cada simulação, mostram-se o erro de localização em metros e seu valor relativo ao comprimento total da área de testes (22.109 metros).

Os resultados com os maiores erros de localização, segundo a Situação 1, são comparados com as respectivas localizações segundo a Situação 2 de monitoramento. Na Figura 40, verifica-se que o defeito 2, que havia sido localizado no ponto 2a (Situação 1), é localizado no ponto 2', que quase coincide com o local efetivo da falta. O mesmo ocorre para o defeito 4, que, na Situação 1, é localizado no ponto 4a e, na Situação 2, tem sua localização estimada no ponto 4'.

Com isso, verifica-se que as tensões medidas pelos Monitores 1 e 2 constituem um incremento de informação, em relação à Situação 1, que permite localizar os defeitos com maior precisão. Isso ocorre porque, durante a localização de um dado defeito, testes de curto-circuitos ligeiramente próximos recebem avaliações distintas, o que permite maior precisão nos resultados.

Núm.	Gerações	Tempo de processamento (s)	Erro de $\mathbf{R}_{\mathbf{f}}(\Omega)$	Erro de localização (m)
1	19	39,5	0	$13,32 \ (0,06 \ \%)$
2	15	31,9	0	10,38(0,05%)
3	13	25,4	0	9,61 (0,04 %)
4	14	25,0	0	$27,06\ (0,12\ \%)$
5	10	20,4	0	9,98~(0,05~%)
6	9	16,9	0	16,16 (0,07 %)
7	13	26,8	0	15,44(0,07%)
8	19	35,0	0	$10,1 \ (0,05 \ \%)$
9	12	24,8	0	3,15(0,01%)
10	9	19,4	0	9,57~(0,04~%)
Média	13,30	26,5	0	12,48~(0,06~%)
D. Padrão	3,44	7,1	0	5,96~(0,02~%)

Tabela 13 – Resultados de localização para as faltas do tipo **ABC** - Situação 2

Fonte: autor

A Tabela 14 contém os resultados de localização dos defeitos **ABG**, simulados na área de testes. Para cada simulação,  $R_f$  é o valor da resistência da falta simulada. São mostrados o número de gerações (tempo para localizar o defeito), o erro de localização em metros e seu valor relativo ao comprimento total da área de testes (22.109 metros).

Os resultados de localização dos defeitos dupla-fase-terra com os maiores desvios segundo a Situação 1, são comparados com as respectivas localizações segundo a Situação 2 de monitoramento. Na Figura 41, verifica-se que o defeito **1**, que é localizado no ponto



Figura 40 – Resultados de localizações dos defeitos ABC 2 e 4, nas Situações 1 e 2. Fonte: autor

1a na Situação 1, é localizado no ponto 1', que quase coincide com o local efetivo da falta. O mesmo ocorreu para o defeito 4, que é localizado no ponto 4a na Situação 1 e, na Situação 2, sua localização é estimada no ponto 4'. Por fim, o defeito 5 tem sua localização estimada com desvio muito pequeno (ponto 5'), cujo desvio é de apenas 35,30 metros.

Núm.	$\mathbf{R_f}(\boldsymbol{\Omega})$	Gerações	Tempo de processamento (s)	Erro de $\mathbf{R}_{\mathbf{f}}(\mathbf{\Omega})$	Erro de localização (m)
1	2,75	26	57,2	0,09	394,94~(1,79~%)
2	1,9	24	51,2	0,04	178,79(0,81%)
3	0,75	14	28,3	$0,\!17$	$216,84 \ (0,98 \ \%)$
4	1,42	24	46,3	$0,\!13$	174 (0,79 %)
5	$^{7,2}$	15	31,6	0,01	35,3 (0,16 %)
6	0,01	25	47,8	0,07	309,32(1,4%)
7	2	23	44,9	0,01	4,83 (0,02 %)
8	$^{4,5}$	30	56,7	0,01	231,04 (1,05 %)
9	$^{1,3}$	21	41,9	0,03	34,33 (0,16 %)
10	1,25	16	34,8	$0,\!12$	193,09 (0,87 %)
11	0,25	24	45,1	0,01	$101,51 \ (0,46 \ \%)$
12	0,25	14	28,0	0,16	$307,43\ (1,39\ \%)$
Mé	dia	21,33	42,8	0,07	$181,79 \ (0,82 \ \%)$
D. P.	adrão	5,09	12,2	0,06	116,30 (0,53 %)

Tabela 14 – Resultados de localização para as faltas do tipo ABG - Situação 2

Fonte: autor

A Tabela 15 contém os resultados de localização dos defeitos **ab**, simulados na área de testes. Para cada simulação,  $R_f$  é o valor da resistência da falta simulada. São mostrados o número de gerações (tempo para localizar o defeito), o erro de localização em metros e



Figura 41 – Resultados de localizações dos defeitos ABG 1, 4 e 5, nas Situações 1 e 2 Fonte: autor

seu valor relativo ao comprimento total da área de testes (22.109 metros).

Os resultados de localização de defeitos dupla-fase com maiores desvios segundo a Situação 1, são comparados com as respectivas localizações segundo a Situação 2 de monitoramento. Na Figura 42, verifica-se que o defeito 5, que é localizado no ponto 5a na Situação 1, é localizado no ponto 5', tendo um desvio de 1120,62 m (5,1 % do comprimento total da área de busca). Porém, uma nova tentativa de localizar o defeito 5 na Situação 2 levou ao ponto 5", a uma distância de 99,6 metros de 5.

O defeito **6** é localizado no ponto **6a** na Situação 1. Na Situação 2, porém, o local estimado é o ponto **6**', que está a 94,53 metros do local efetivo da falta. A localização do defeito 12 é estimada no ponto 12a (Situação 1). As condições de monitoramento da Situação 2, porém, não trouxeram melhoria significativa para a localização desse defeito, cuja localização é estimada no ponto 12' (Situação 2). Executando o algoritmo novamente, tem-se a localização no ponto 12", a uma distância de 90 metros do local efetivo da falta.

A Tabela 16 contém os resultados de localização dos defeitos **AG**, simulados na área de testes. Para cada simulação,  $R_f$  é o valor da resistência da falta simulada. São mostrados o número de gerações (tempo para localizar o defeito), o erro de localização em metros e seu valor relativo ao comprimento total da área de testes (22.109 metros).

Os resultados de localização de defeitos fase-terra com maiores desvios segundo a Situação 1, foram comparados com as respectivas localizações segundo a Situação 2 de monitoramento. Na Figura 43, verifica-se que o defeito 1 é localizado no ponto 1a na

Núm.	$\mathbf{R_f}(\boldsymbol{\Omega})$	Gerações	Tempo de processamento (s)	Erro de $\mathbf{R}_{\mathbf{f}}(\mathbf{\Omega})$	Erro de localização (m)
1	0,5	16	30,2	0,01	50,15~(0,23~%)
2	0,01	16	32,7	0,07	283,59 (1,28 %)
3	0,01	11	20,5	0	4,44 (0,02 %)
4	0,01	16	32,2	0,04	$16,74 \ (0,08 \ \%)$
5	1,5	14	27,8	0,37	1120,62(5,07%)
6	1	17	32,0	$0,\!14$	94,53~(0,43~%)
7	0,01	14	30,1	0,02	$103,57 \ (0,47 \ \%)$
8	0,01	14	29,7	0	16,91 (0,08 %)
9	1,45	18	37,3	0,03	$53,61 \ (0,24 \ \%)$
10	0,01	23	46,0	0,01	40,93~(0,19~%)
11	0,01	22	43,3	0	$50,66 \ (0,23 \ \%)$
12	$^{0,7}$	17	34,0	$0,\!453$	1059 (4,79 %)
Mé	dia	16,50	33,0	0,09	241,23 (1,09 %)
D. P.	adrão	$3,\!23$	$6,\!8$	$0,\!15$	386,14 (1,75 %)

Tabela 15 – Resultados para as faltas do tipo<br/>  ${\bf AB}$  - Situação 2

Fonte: autor



Figura 42 – Resultados de localizações dos defeitos AB 5, 6 e 12, nas Situações 1 e 2 Fonte: autor

Situação 1 e, na Situação 2, sua localização é estimada no ponto 1', que está a uma distância de 445,32 metros do ponto efetivo de defeito. Esse desvio corresponde a 2,01 % do comprimento total da área de teste.

O defeito 5, cuja localização é estimada no ponto 5a na Situação 1, é localizado no ponto 5' na Situação 2, a uma distância de 926,18 metros do ponto 5 (desvio que representa 4,19 % do comprimento total da área de teste). Em uma nova tentativa de localização, o defeito 5 é localizado no ponto 5", situado a 39,6 metros do ponto efetivo da falta.

Por sua vez, o defeito **6** tem sua localização estimada no ponto **6a** na Situação 1. Porém, sua localização estimada na Situação 2 é o ponto **6**', que dista 118,37 metros do ponto **6**.

Núm.	$\mathbf{R_f}(\boldsymbol{\Omega})$	Gerações	Tempo de <b>processamento (s)</b>	Erro de $\mathbf{R}_{\mathbf{f}}(\mathbf{\Omega})$	Erro de localização (m)
1	0,01	14	28,8	0,48	445,32 (2,01 %)
2	$^{2,5}$	16	32,8	0,1	$110,94 \ (0,50 \ \%)$
3	1,25	13	26,0	0,23	588,63(2,66%)
4	3,75	20	35,9	0,02	26,8 (0,12 %)
5	0,5	26	51,2	0,25	926,18(4,19%)
6	0,75	19	$36,\!5$	0,2	118,37 (0,54 %)
7	$0,\!45$	22	45,5	0,05	283,09 (1,28 %)
8	1,5	21	42,8	0,07	194,16 (0,88 %)
9	3,2	19	40,7	0,16	424,1 (1,92 %)
10	$7,\!5$	21	39,7	0,02	66,45(0,30%)
11	12	17	36,1	0	0,13(0,00%)
12	1,21	15	34,2	0,13	70,56(0,32%)
13	$1,\!21$	26	$52,\!4$	0,01	32,21 (0,15 %)
Mé	dia	19,15	38,7	0,13	252,84 (1,14 %)
<b>D.</b> Pa	adrão	3,98	7,9	$0,\!13$	264,10 (1,19 %)

Tabela 16 – Resultados para as faltas do tipo AG - Situação 2

Fonte: autor

A Tabela 17 resume, segundo a Situação 2, as informações relativas ao tempo de execução do algoritmo, do erro de resistência de falta e do erro de localização, em metros e relativo ao comprimento total da área de testes.

Tabela 17 – Resultados de Localização - Situação 2

	Gerações	Tempo de processamento (s)	Erro de $\mathbf{R_f}$ $(\Omega)$	Erro de localização (m)
Máximo	30	57,2	$0,\!48$	1120,62~(5,07~%)
Mínimo	9	16,9	0	0,13 (0,00 %)
Média	17,79	35,7	0,08	180,59(0,82%)
Desvio-padrão	4,96	9,9	0,12	263,09 (1,19 %)

Fonte: autor

#### 5.2.5.3 Situação 3

Conforme mencionado em 5.2.3, a Situação 3 se baseia em medições dos mesmos dispositivos considerados da Situação 2, além de alarmes de ausência de tensão ("Last



Figura 43 – Resultados de localizações dos defeitos AG 1, 5 e 6, nas Situações 1 e 2 Fonte: autor

Gasp"), agregados nos transformadores de distribuição da área de testes.

Para as análises da Situação 3 de monitoramento, foram simulados defeitos na área de testes, em trechos protegidos por fusíveis. Localizar defeitos nesses locais é particularmente interessante porque a abertura de fusíveis não é detectada pelo sistema SCADA. A recepção dos alarmes de ausência de tensão, associados aos consumidores afetados, têm a função de inicializar um processo de localização de falta.

Os defeitos trifásicos (**ABC**), simulados na área de testes e com  $R_f = 0 \Omega$ , são listados na Tabela 18. Para cada simulação, são mostrados o erro de localização em metros e seu valor relativo ao comprimento do bloco afetado.

Núm.	Comprimento do bloco (m)	Gerações	Tempo de processamento (s)	Erro de $\mathbf{R}_{\mathbf{f}}(\mathbf{\Omega})$	Erro de localização (m)
1	761,7	10	20,9	0	0,24~(0,03~%)
2	761,7	6	12,2	0	0,33 (0,04 %)
3	724,8	6	11,0	0	$6,13 \ (0,85 \ \%)$
4	394	7	$13,\!6$	0	$1,19 \ (0,30 \ \%)$
5	$807,\!9$	8	15,9	0	28,63(3,54%)
	Média	7,40	14,7	0	7,30
	D. Padrão	$1,\!49$	3,9	0	10,88
			Fonte: autor		

Tabela 18 – Resultados para as faltas do tipo **ABC** - Situação 3

As tabelas 19, 20 e 21 contêm os resultados de localização dos defeitos **ABG**, **AB** e **AG**, respectivamente, simulados na área de testes, à jusante de chaves fusíveis. Para cada simulação,  $R_f$  é o valor da resistência da falta simulada e "**Comp. Bloco**" é o comprimento em metros do bloco à jusante da chave fusível. São mostrados o número de gerações (tempo para localizar o defeito), o erro de localização em metros e seu valor relativo ao comprimento do bloco afetado.

Núm.	Comprimento do bloco (m)	$\mathbf{R_f}(\boldsymbol{\Omega})$	Gerações	Tempo de processamento (s)	Erro de $\mathbf{R}_{\mathbf{f}}(\mathbf{\Omega})$	Erro de localização (m)
1	761,7	0,5	17	35,7	0	0,53~(0,07~%)
2	761,7	$1,\!5$	14	29,5	0,05	45,34(5,95%)
3	724,8	0,5	22	41,7	0,05	61,39 $(8,47 %)$
4	394	2	11	20,3	0,04	50,71 (12,87 %)
5	807,9	$^{1,5}$	14	28,1	0,31	398,07 (49,27 %)
	Média D. Padrão		$15,\!60 \\ 3,\!72$	$31,1 \\ 8,1$	$0,09 \\ 0,11$	$111,21 \\ 144,93$

Tabela 19 – Resultados para as faltas do tipo<br/>  ${\bf ABG}$  - Situação 3

Fonte: autor

Tabela 20 – Resultados para as faltas do tipo AB - Situação 3

Núm.	Comprimento do bloco (m)	$\mathbf{R_f}(\boldsymbol{\Omega})$	Gerações	Tempo de processamento (s)	Erro de $\mathbf{R}_{\mathbf{f}}(\mathbf{\Omega})$	Erro de localização (m)
1	761,7	0,1	20	40,5	0,04	118,09 (15,50 %)
2	761,7	0,01	12	22,6	0,03	55,79 (7,32 %)
3	724,8	0,5	15	31,6	0,03	39,23(5,41%)
4	394	0,75	10	19,4	0,05	76,72 (19,47 %)
5	$807,\!9$	$0,\!01$	9	17,8	0,03	35,58(4,40%)
	Média D. Padrão		$13,20 \\ 3,97$	$26,4 \\ 9,5$	$0,04 \\ 0,01$	$65,08 \\ 30,23$

Fonte: autor

Tabela 21 – Resultados para os defeitos do tipo  $\mathbf{AG}$  - Situação 3

Núm.	Comprimento do bloco (m)	$\mathbf{R_f}(\boldsymbol{\Omega})$	Gerações	Tempo de processamento (s)	Erro de $\mathbf{R}_{\mathbf{f}}(\Omega)$	Erro de localização (m)
1	761,7	$1,\!87$	10	18,3	0,117	222,25 (29,18 %)
2	761,7	$4,\!65$	13	26,3	0	0,23~(0,03~%)
3	724,8	$^{5,5}$	11	21,5	0,04	41,55(5,73%)
4	394	$^{3,2}$	20	39,8	0,03	29,22 (7,42 %)
	Média D. Padrão		$13,\!50 \\ 3,\!91$	$26,5 \\ 9,5$	$0,05 \\ 0,04$	$73,31 \\ 87,29$

Fonte: autor

Os pontos onde os defeitos são simulados estão ilustrados pelos pontos vermelhos da Figura 44.

A Tabela 22 resume as informações relativas ao tempo de execução do algoritmo, do erro de resistência de falta e do erro de localização (em metros) para as localizações das faltas simulações segundo a Situação 3.


Figura 44 – Defeitos simulados na Situação 3 Fonte: autor

	Gerações	Tempo de processamento (s)	Erro de $\mathbf{R_{f}}~(\Omega)$	Erro de localização (m)
Máximo Mínimo	22 $6$	$41,7 \\ 11,0$	$\substack{0,32\\0}$	$398,07 \\ 0,23$
Média Desvio-padrão	$12,37 \\ 4,61$	24,6 9,7	$0,04 \\ 0,07$	$63,75 \\ 94,10$

Tabela 22 – Resultados de Localização - Situação 3

### 5.2.5.4 Considerações

Os defeitos a serem localizados são simulados na Área de Testes, com comprimento total de 22.109 metros. Nas condições de monitoramento da Situação 1, a informação de atuação da religadora permite assumir que a Área de Testes é a área de buscas dos defeitos.

Dos 10 defeitos trifásicos localizados, 7 têm erro de localização abaixo de 300 metros. Os erros dos demais defeitos ultrapassam 1.000 metros. Nesses casos, mais de uma localização é solução do problema. Dos 12 defeitos dupla-fase-terra, 7 têm erro abaixo de 500 metros, sendo que os demais incorrem no problema de múltiplas soluções. Dos 12 defeitos dupla-fase localizados, apenas 3 apresentam localização com erro acima de 1.000 metros, sendo que as demais não superaram 500 metros. Por fim, das 13 localizações de defeitos fase-terra, apenas 4 têm erro superando 1.000 metros.

Analisando os resultados das localizações da Situação 1 com os maiores erros, nota-se que, em novas tentativas de localização, outros pontos são fornecidos como solução. De fato, simulações do mesmo defeito, em qualquer desses pontos, fornecem conjuntos de medições muito próximas nos pontos monitorados, justificando os erros de localização.

As condições de monitoramento da Situação 2 representam uma tentativa de melhorar os resultados de localização dos defeitos simulados na Situação 1. Isso se deve ao fato de que a Situação 2 considera medições de tensões em dois pontos fundamentais da Área de Testes (vide Figura 32). Assim, a princípio, o conjunto de possíveis soluções fica reduzido.

A expectativa de obter melhores resultados com maior monitoramento da área de buscas se confirma com os resultados da Situação 2. A partir dos valores de média e desviopadrão dos erros (de  $R_f$  e de localização), nota-se que a média do erro da localização cai de 629,76 m para 180,59 m (redução de 71,3 %), e o desvio-padrão do erro de localização cai de 744,55 m para 263,09 m (redução de 64,7 %).

Outrossim, os resultados da Situação 1 com os maiores erros de localização apresentam melhora na Situação 2, embora alguns pouquíssimos casos incorram em erros acima de 1.000 metros. Isso se deve ao fato de que o monitoramento adicional da Situação 2 traz maiores benefícios para localizar defeitos à jusante dos novos pontos monitorados. Então, na prática, é mais vantajoso instalar dispositivos de medição no início de ramais que atendem a um número expressivo de consumidores. Nessas regiões, localizar faltas com maior precisão implica reduções nos tempos de atendimento capazes de melhorar os índices de continuidade da distribuidora.

Na Situação 3, a inserção das informações de *Last Gasp* (ausência de tensão) proporciona um salto no desempenho do algoritmo para localizar defeitos à jusante de chaves fusíveis. Isso se deve ao fato de que, apenas os consumidores do bloco afetado enviam esse alarme. Então, tenta-se localizar a falta apenas ao longo dos trechos do bloco com defeito. Cabe ressaltar, porém, que se assume a hipótese de que atuará apenas o fusível responsável pela zona de proteção. Da Situação 2 para a 3 houve redução do erro de localização, caindo de 180,59 m para 63,75 m - redução de 64,70 %. Os valores de desvio-padrão do erro da localização também caem, nessa ordem.

Esses primeiros resultados permitem afirmar que o incremento do emprego de informações acerca do defeito traz benefícios relevantes para a localização de faltas. Nos testes realizados, esse incremento é feito pela inserção de medição de tensão na área de busca e restrição da área de busca (a partir dos alarmes de *Last Gasp*).

Pode-se considerar que a Situação 3 representa a melhor condição de monitoramento para localização do defeito, já que a área de busca é a menor possível. Nessa condição, o máximo erro de localização foi de 398,07 m, ou seja, uma distância menor que 400 m. Esse número pode ser considerado um bom resultado de localização de defeitos, principalmente para um alimentador com a extensão desse considerado neste estudo.

### 5.2.6 Influência das ramificações

Os mesmos resultados de localização descritos no item anterior (5.2.5) são analisados segundo a região geográfica. Para cada tipo de falta, são apresentados os resultados em

duas regiões: Área 1 e Área 2, previamente indicadas pela Figura 31. A Área 1 tem topologia bastante ramificada. A Área 2, por sua vez, consiste em uma sequência de trechos, sem ramais. São consideradas as Situações 1 e 2 de monitoramento do sistema analisado.

Espara-se que os resultados de localizações na área mais ramificada apresentem erros maiores em relação àqueles na área não ramificada, pois a primeira contém diversos pontos que equidistam do ponto de referência para medições de tensões e correntes. Conforme verificado na sub-seção anterior, os resultados de localizações segundo as situações de maior monitoramento apresentam erros menores. Então, espera-se que os erros de localização segundo a Situação 2 de monitoramento sejam menores que os erros de localização com a Situação 1 de monitoramento.

#### 5.2.6.1Situação 1

Os resultados de localização das faltas simuladas no item anterior (5.2.5) são separados em relação à região geográfica (Área 1 e Área 2). Os defeitos e os resultados de suas localizações, segundo a Situação 1, são listados na Tabela 23.

	Lo	calizações de falta	s na Área 1	Lo	calizações de falta	s na Área 2	
Falta	Núm.	Erro de $R_{f}(\Omega)$	Erro Loc. (m)	Núm.	Erro de $R_{f}(\Omega)$	Erro Loc. (m)	
	1	0	167,44	7	0	160,03	
	2	0	1793	8	0	285,31	
ADC	3	0	220,51	9	0	12,38	
ABC	4	0	1056	10	0	13,45	
	5	0	275,71				
	6	0	2732				
	1	0,437	1717,5	7	0,035	128,2	
	2	0,265	1033,24	8	0,025	112,14	
ABC	3	0,029	1043,5	9	0,211	1472	
ADG	4	0,152	1589,2	10	0,184	453,4	
	5	0,266	$1374,\!64$	11	0,07	85,92	
	6	$0,\!175$	125,78	12	0,159	$186,\!88$	
	1	0,005	12,75	7	0,105	$6,\!63$	
	2	0,161	436,07	8	0,006	59,23	
A D	3	0,001	2,18	9	0,013	$97,\!17$	
AD	4	$0,\!146$	$63,\!07$	10	0,002	85,46	
	5	0,662	1813, 19	11	0,014	6,59	
	6	0,054	$1581,\!31$	12	0,355	$1228,\!8$	
	1	0,302	1890,65	7	0,037	1507,3	
	2	0,181	175,44	8	0,055	126,41	
	3	0,02	$19,\!63$	9	0,063	228,2	
AG	4	0,116	126, 19	10	0,03	$102,\!65$	
	5	0,268	1554,29	11	0,003	1,9	
	6	$0,\!436$	2167,85	12	0,225	$242,\!18$	
		·		13	0,025	25,2	
			Easter an	ton			

Tabela 23 – Localizações de defeitos nas Áreas 1 e 2, segundo a Situação 1

Fonte: autor

A Tabela 24 resume as informações dos resultados de localização dos defeitos simulados nas Áreas 1 e 2, segundo a Situação 1.

	Loca	lizações	s de faltas	na Área 1	Localizações de faltas na Área 2					
Falta	<b>Erro de <math>\mathbf{R}_{\mathbf{f}}</math></b> $\mu(\Omega)  \sigma(\Omega)$		$\begin{array}{c} {\bf Erro \ de \ Localização} \\ \mu(m) & \sigma(m) \end{array}$		$\begin{array}{cc} \mathbf{Erro} \ \mathbf{de} \ \mathbf{R_f} \\ \mu(\Omega)  \sigma(\Omega) \end{array}$		Erro de Localização $\mu(m) \qquad \sigma(m)$			
ABC ABG AB AG	$0\\0,22\\0,17\\0,22$	$0\\0,13\\0,23\\0,13$	$1040,78 \\ 1147,31 \\ 651,43 \\ 989,01$	952,82 522,71 756,79 900,76	$0\\0,11\\0,08\\0,06$	$0 \\ 0,07 \\ 0,13 \\ 0,07$	$     \begin{array}{r}       117,79 \\       406,42 \\       247,31 \\       319,12     \end{array} $	113,85492,04440,32492,37		
Média Desvio-padrão	$^{0,1}_{0,1}$	$5 \Omega$ 7 $\Omega$	$957 \\ 822$	$,13\ m$ $,01\ m$	$^{0,0}_{0,0}$	$7 \ \Omega$ $9 \ \Omega$	28 44	$^{8,15}m_{6,31}m$		

Tabela 24 – Resultados de localização segundo a Situação 1 - Áreas 1 e 2

### 5.2.6.2 Situação 2

Os resultados de localização das faltas simuladas no item anterior (5.2.5) são separados em relação à região geográfica (Área 1 e Área 2). Os defeitos e os resultados de suas localizações, segundo a Situação 2, são listados na Tabela 25.

	Lo	calizações de falta	s na Área 1	Lo	calizações de falta	s na Área 2	
Falta	Núm.	Erro de $\mathbf{R_f}(\mathbf{\Omega})$	Erro Loc. (m)	Núm.	Erro de $R_{f}(\Omega)$	Erro Loc. (m)	
	1	0	13,32	7	0	$15,\!44$	
	2	0	10,38	8	0	10,1	
ADC	3	0	9,61	9	0	$3,\!15$	
ADU	4	0	27,06	10	0	9,57	
	5	0	9,98				
	6	0	16,16				
	1	0,088	394,94	7	0,005	4,83	
	2	0,036	178,79	8	0,007	231,04	
ABC	3	0,166	$216,\!84$	9	0,032	34,33	
ABG	4	0,125	174	10	0,123	193,09	
	5	0,006	35,3	11	0,007	101,51	
	6	0,074	309,32	12	0,161	$307,\!43$	
	1	0,004	$50,\!15$	7	0,017	$103,\!57$	
	2	0,073	283,59	8	0	16,91	
	3	0	$4,\!44$	9	0,027	$53,\!61$	
	4	0,036	16,74	10	0,009	40,93	
	5	0,368	$1120,\!62$	11	0	$50,\!66$	
	6	$0,\!143$	$94,\!53$	12	$0,\!453$	1059	
	1	$0,\!477$	$445,\!32$	7	0,052	283,09	
	2	0,104	110,94	8	0,071	194, 16	
	3	0,231	$588,\!63$	9	0,163	424,1	
AG	4	0,021	26,8	10	0,016	66,45	
	5	0,251	926, 18	11	0	0,13	
	6	0,198	$118,\!37$	12	0,129	70,56	
			·	13	0,004	32,21	

Tabela 25 – Localizações de defeitos nas Áreas 1 e 2, segundo a Situação 2

Fonte: autor

A Tabela 26 resume as informações dos resultados de localização dos defeitos simulados nas Áreas 1 e 2, segundo a Situação 2.

	Loca	lizações	s de faltas	na Área 1	Localizações de faltas na Área 2				
Falta	Erro $\mu(\Omega)$	$\frac{\mathbf{de} \ \mathbf{R_f}}{\sigma(\Omega)}$	Erro de $\mu(m)$	$\begin{array}{c} \mathbf{Localização} \\ \sigma(m) \end{array}$	Erro $\mu(\Omega)$	$\frac{\mathbf{de} \ \mathbf{R_f}}{\sigma(\Omega)}$	Erro de $\mu(m)$	$\begin{array}{c} \mathbf{Localização} \\ \sigma(m) \end{array}$	
ABC ABG AB AG	$0\\0,08\\0,10\\0,21$	$0\\0,05\\0,13\\0,14$	$\begin{array}{c} 14,\!42\\ 218,\!20\\ 261,\!68\\ 369,\!37 \end{array}$	6,10 112,92 395,20 319,12	$\begin{array}{c} 0 \\ 0,06 \\ 0,08 \\ 0,06 \end{array}$	$0,00 \\ 0,06 \\ 0,17 \\ 0,06$	9,57 145,37 220,78 152,96	$\begin{array}{c} 4,36\\ 107,92\\ 375,75\\ 143,61\end{array}$	
Média Desvio-padrão	$0,1 \\ 0,1$	$\begin{array}{c} 0 \ \Omega \\ 2 \ \Omega \end{array}$	213 290	$5,92 \ m$ $0,28 \ m$	$0,0 \\ 0,1$	6Ω 0Ω	$\frac{14}{22}$	${}^{3,73}_{5,51} m$	

	Tab	oela	26 -	- Res	sulta	dos	de	loca	lizad	cão	segundo	a	Situa	cão	$2 \cdot$	- Areas	1	е	2
--	-----	------	------	-------	-------	-----	----	------	-------	-----	---------	---	-------	-----	-----------	---------	---	---	---

### 5.2.6.3 Considerações

A análise dos resultados de localização de faltas, considerando as Áreas 1 e 2 investigadas, mostra que o desempenho da metodologia é afetado pela presença de ramificações na área de busca. Segundo a Situação 1, a localização de defeitos na Área 1 está associada a um erro médio de 957,13 m, enquanto a localização de faltas na Área 2 está associada a um erro médio de 288,15 m. Essa diferença também se nota no valor médio do erro da resistência de falta: 0,15  $\Omega$  na Área 1 e 0,07  $\Omega$  na Área 2.

A mesma tendência é percebida quando se analisam defeitos nessas duas áreas, considerando a Situação 2, em que se emprega maior nível de monitoramento da rede. Nesse caso, o erro médio de localização é 215,92 m na Área 1 e 143,73 m na Área 2. Para as duas regiões, porém, os erros médios são menores para a Situação 2, em relação àqueles da Situação 1.

### 5.2.7 Influência do tipo de defeito

Neste item, analisa-se o desempenho do algoritmo face aos diferentes tipos de defeito. As análises são feitas com base nos resultados de localização descritos no item (5.2.5). As tabelas 27, 28 e 29 apresentam os erros médios (de  $R_f$  e de localização) para os 4 tipos de defeito, para as Situações 1, 2 e 3, respectivamente.

Tipo	$\begin{array}{c} {\bf Erro}~{\bf M\acute{e}dio}\\ {\bf de}~{\bf R_f}~({\bf \Omega}) \end{array}$	Erro Médio de Localização (m)						
ABC 0 671,58								
ABG	0,17	776,87						
AB	0,13	449,37						
AG	$0,\!14$	$628,\!30$						
Fonte: autor								

Tabela 27 – Resultados de Localização para a Situação 1

Apresentando graficamente os resultados das tabelas, gera-se o gráfico da Figura 45. Para cada tipo de defeito, nota-se o padrão decrescente das barras relativas às Situações 1,

Tipo	$\begin{array}{c} {\bf Erro}~{\bf M\acute{e}dio}\\ {\bf de}~{\bf R_f}~(\Omega) \end{array}$	Erro Médio de Localização (m)						
ABC	0	12,48						
ABG	0,07	181,79						
AB	0,09	241,23						
AG	$0,\!13$	$252,\!84$						
	Fonte: autor							

Tabela 28 – Resultados de localização para a Situação 2

Tipo	$\begin{array}{c} {\bf Erro}~{\bf M\acute{e}dio}\\ {\bf de}~{\bf R_f}~(\Omega) \end{array}$	Erro Médio de Localização (m)
ABC	0	7,30
ABG	0,09	111,21
AB	0,04	65,08
AG	0,05	73,31

2 e 3, respectivamente. Isso indica que o aumento da quantidade de informações melhora o desempenho do algoritmo.

A metodologia de localização de faltas apresenta seus resultados mais prejudicados em casos de pouca informação sobre o defeito, como na Situação 1. Os resultados são mais afetados para a localização de defeitos dupla-fase-terra (abg). Por outro lado, a Situação 1 fornece bons resultados para a localização de defeitos dupla-fase, apresentando erro médio abaixo de 0,5 km.

Analisando as Situações 2 e 3, em que se tem maior riqueza de informações do sistema acerca do defeito, nota-se que o algoritmo tem seu melhor desempenho para defeitos trifásicos. Isso ocorre porque a resistência de falta é considerada  $R_f = 0$  para as faltas trifásicas. Assim, o espaço de buscas é unidimensional. De modo geral, o algoritmo nessas situações fornece a localização com erros médios menores que 300 m, o que pode ser considerado um bom desempenho.

## 5.3 Estudo aplicado a defeito real 1

Neste item, investiga-se um evento de curto-circuito real, registrado por alguns sistemas corporativos da distribuidora responsável pelo circuito afetado. Dentre esses registros, é possível identificar o local do defeito, que foi apontado pela equipe de manutenção.

Este estudo de caso tem por objetivo demonstrar o funcionamento da metodologia proposta por este trabalho, realizando a localização do referido defeito. Como insumo de dados, são considerados dados topológicos e relativos aos consumidores, bem como as medições de tensão e corrente registradas pelos sistemas corporativos. O resultado é comparado com a localização da falta registrada pela equipe de manutenção.



Figura 45 – Resultados organizados por tipo de defeito. Fonte: autor

### 5.3.1 Descrição do caso

O alimentador e os equipamentos de proteção e monitoramento envolvidos neste estudo de caso são representados pela Figura 46, em que **SE** representa o local da subestação e o **X** vermelho indica o ponto do defeito, conforme o registro da equipe de manutenção.

Nessa figura, as áreas na cor cinza representam os Blocos 1 e 2, que estão à jusante do sensor (indicado pelo círculo verde) sensibilizado pela corrente de defeito. O comprimento total dos trechos nesses blocos é de 1.115 m e o comprimento total dos trechos do alimentador é de 6.463 m.

### 5.3.2 Entrada de dados

### 5.3.2.1 GIS

O sistema GIS da concessionária contém informações cadastrais do circuito analisado. Elas permitem gerar um modelo da rede elétrica, representando equivalentes, trechos, chaves, consumidores, dentre outros equipamentos. A atualização dessas informações é fundamental para a precisão dos resultados do algoritmo de Localização de Faltas.

### 5.3.2.2 SCADA

Quando da ocorrência do curto-circuito, o relé do disjuntor do alimentador detecta corrente que caracteriza um defeito e comanda a atuação do disjuntor. Como consequên-



Figura 46 – Descrição do estudo de caso 1 Fonte: autor

cia, envia ao SCADA algumas informações, sendo que as principais são listadas pela Tabela 30.

Tabela 30 – Registro do evento de curto-circuito no SCADA.

Informação	Valor					
RelayType	SEL-351A					
Substation	$\mathrm{FDR}$					
Equipment FDR-01J7						
EventDate 27/08/2016 11:0						
Ifault 2700						
Fonte: autor						

Essas informações permitem determinar a subestação, o alimentador e o instante de ocorrência do evento de defeito. Por outro lado, não permitem determinar o tipo de defeito e não contêm medições de tensão durante o curto-circuito.

### 5.3.2.3 Sistema de proteção

Devido à detecção do defeito e atuação, o relé do disjuntor registra uma grande quantidade de informações acerca da falta. A Tabela 31 apresenta um resumo das informações registradas e a Figura 47 representa as oscilografias de tensão e corrente, durante a ocorrência do evento.

Nota-se que o sistema de proteção detém um conjunto detalhado de medições durante uma janela de tempo que contém o instante do curto-circuito. Analisando as formas de



Tabela 31 – Registro do evento de curto-circuito no sistema de proteção.

Figura 47 – Oscilografias de tensão e corrente durante o curto-circuito. Fonte: autor

onda das oscilografias, é possível estimar os fasores de frequência fundamental das tensões e das correntes de defeito.

### 5.3.2.4 Sensores

O alimentador investigado contém apenas um sensor de corrente. Ele detectou a passagem de corrente de defeito permanente pelas fases A e B, conforme ilustra a Figura 48, que representa os alarmes do sensor. Dessa forma, define-se a área de busca do defeito formada pelos Blocos 1 e 2 da Figura 46. Com base nos dados do sensor, verifica-se que o restabelecimento do serviço, com passagem de corrente normal de carga, ocorre após aproximadamente 90 minutos do início da falta.

🔚 Sen:	sor FDR01J7.csv 🔀							
1	27/08/2016	11:07:59	R72 F03006 FDR01J7 H	FPEAE Falt	a Permanente	Fase A F	03006 A	LARME
2	27/08/2016	11:07:59	R72_F03006_FDR01J7_H	PEBE Falt	a Permanente	Fase B F	03006 A	LARME
3	27/08/2016	12:34:29	R72_F03006_FDR01J7_H	FPEAE Falt	a Permanente	Fase A F	'03006 N	ORMAL
4	27/08/2016	12:34:29	R72_F03006_FDR01J7_H	PEBE Falt	a Permanente	Fase B F	03006 N	ORMAL
Normal	text file		length : 394 lines : 4	Ln:1 Col:1 Sel:0	0	Windows (CR LF)	UTF-8	INS

Figura 48 – Dados de alarme do sensor que detectou curto-circuito. Fonte: autor

### 5.3.3 Resultados

A partir do modelo da rede elétrica investigada, das medições de corrente e tensão durante o curto-circuito e dos alarmes de atuação do sensor, realiza-se a localização da falta. Como resultado da execução do algoritmo, o ponto estimado do defeito é ilustrado na Figura 49, pelo X azul (Falta Estimada 1). Os resultados do processo de localização são listados na Tabela 32. Eles são obtidos a partir da comparação entre o local estimado do defeito e o local do defeito identificado pela equipe de manutenção.

Tabela 32 – Resultados da Localização da Falta.

Parâmetro	Valor
Tipo de Defeito Resistência de Falta	$\substack{\text{AB}\\3.27\ \Omega}$
Comprimento Total da Área de Busca Erro de Localização	1.115 m 135 m (12 % do Comp. Total)
Erro de Localização	135 m (12 % do Comp. To

Fonte: autor

Uma situação de maior quantidade de dados seria aquela em que os alarmes de ausência de tensão - disponíveis nos medidores dos consumidores MT e agregados nos transformadores de distribuição - podem ser utilizados pela aplicação de localização de faltas. Supondo essa situação, medidores inteligentes dos consumidores do Bloco 1 e do Bloco 2 emitiriam alarme de ausência de tensão.

Considerando a coordenação de proteção entre os fusíveis associados a esses blocos e a emissão dos alarmes de ausência de tensão, a área de busca ficaria restrita aos trechos do Bloco 1. Executando o algoritmo de Localização de Faltas nessas condições, tem-se como resultado de localização o ponto indicado por um "X" verde (Falta Estimada 2) na Figura 49. Esse ponto dista 65 m do local efetivo do defeito, um erro de 6% em relação ao comprimento total da área à jusante do sensor atuante.

### 5.3.4 Considerações

O alimentador investigado contém alguns monitores previamente instalados: o relé do disjuntor no início do alimentador e o sensor instalado junto ao fusível do Bloco 1. A informação de que o sensor foi sensibilizado indica que a falta ocorreu à jusante dele.

Considerando que o alimentador tem comprimento total de 6.463 m e que a área à jusante do sensor (área de busca) tem comprimento total de 1.115 m, a área de busca



Figura 49 – Resultados de localização da falta Fonte: autor

representa 17,25 % do comprimento total. O algoritmo de Localização de Faltas proposto por este trabalho fornece resultado de localização com erro de 135 m, que representa apenas 12 % da área de busca à jusante do sensor e 2,09 % do comprimento total do alimentador.

Verifica-se que os alarmes de falta de tensão - disponíveis em medidores inteligentes de clientes MT e BT - trariam benefício considerável para a metodologia de Localização de Faltas, já que a restrição da área de busca seria ainda maior.

A disponibilidade de informações de diversos sistemas acerca de um determinado evento viabiliza a metodologia proposta. Porém, é fundamental considerar que os dados e as medições podem ser afetados por ruídos e imprecisões.

Outro problema prático é a determinação do valor eficaz de corrente de defeito que o algoritmo deve considerar. Analisando as formas de onda de tensão e corrente medidas, verifica-se que seus valores eficazes variam durante o defeito. A precisão da localização da falta pode ser afetada em função da estimação desses valores eficazes.

# 5.4 Estudo aplicado a defeito real 2

Neste item, investiga-se um evento de curto-circuito real que atinge um alimentador primário de uma empresa de distribuição. Esse evento foi registrado por alguns equipamentos de campo, além de ter sido localizado efetivamente por uma das equipes de manutenção.

Pretende-se executar a metodologia proposta neste trabalho para localizar o defeito em questão. Os resultados obtidos são comparados com a localização da falta registrada pelas equipes de campo.

### 5.4.1 Descrição do caso

O alimentador investigado tem extensão total de 90,14 km e possui dois grandes ramais, como indicado pela Figura 50. No início do Ramal 2, que contém o local efetivo da falta, considera-se hipoteticamente um sensor de corrente de curto-circuito para efeito de análise. Também são considerados os medidores de qualidade hipotéticos "Medidor 1" e "Medidor 2", em cada ramal.



Figura 50 – Descrição do estudo de caso 2 $${\rm Fonte:}$ autor $}$ 

### 5.4.2 Entrada de dados

### 5.4.2.1 GIS

O sistema GIS contém o cadastro dos elementos físicos de rede, tais como trechos, chaves, consumidores, dentre outros. Para um dado elemento cadastrado, citam-se alguns parâmetros: posição georreferenciada, comprimento, tipo e conectividade. Essas informações subsidiam a criação e a atualização do modelo digital da rede elétrica analisada. É possível que elementos de rede sejam acrescentados ou removidos ao longo do tempo. Eles também podem ter seus parâmetros alterados. Se essas alterações não se refletirem para o modelo digital da rede, a metodologia de localização pode ter seus resultados comprometidos, fornecendo soluções muito imprecisas, por exemplo. Então, manter os dados de cadastro atualizados é fundamental para melhorar a precisão dos resultados da metodologia de Localização de Faltas.

### 5.4.2.2 Sistema de Proteção

Devido à ocorrência do curto-circuito, o relé do disjuntor do alimentador registra os principais parâmetros das tensões e correntes durante o defeito. A Tabela 33 apresenta as principais informações registradas e a Figura 51 representa as oscilografias de tensão e corrente, durante o evento. Com base nesses dados, nota-se que se trata de um curto-circuito fase-terra (AG).



Figura 51 – Oscilografias de tensão e corrente durante o curto-circuito. Fonte: autor

Tabela 33 – Registro do evento de curto-circuito no sistema de proteção

Informação	Valor	Informação	Valor
RelayType	SEL-351A	IAFault	64
Substation	CMC	IBFault	11
EventDate	28/02/2017 07:25	ICFault	18
EventType	AG	INFault	50
	Fonte: auto	or	

Analisando-se as formas de onda das oscilografias, pode-se estimar os fasores de frequência fundamental de tensão e corrente no início do alimentador registrados durante o defeito.

#### 5.4.2.3 Dados de dispositivos hipotéticos

Neste estudo de caso, são considerados hipoteticamente alguns dispositivos de campo, que poderiam fornecer mais subsídios à metodologia de localização de faltas. São eles:

- □ Sensor de corrente de curto-circuito instalado no início de um ramal extenso, como o ramal 2, e indica a passagem de corrente de defeito.
- Medidor de qualidade geralmente instalado para monitorar tensões e correntes de grandes consumidores de média-tensão, fornece medições de tensão durante o evento de curto-circuito.

### 5.4.3 Resultados

Inicialmente, a metodologia é executada considerando apenas os fasores obtidos das oscilografias registradas pelo disjuntor do alimentador. O resultado da localização é ilustrado pelo  $\mathbf{X}$  vermelho da Figura 52. Nota-se que a metodologia fornece uma solução de curto-circuito  $\mathbf{AG}$  com  $R_f = 45,29\Omega$  no ramal vizinho, porém praticamente equidistante da solução efetiva (posição ilustrada pelo  $\mathbf{X}$  verde da mesma figura), em relação à subestação. A discrepância do resultado se deve ao número reduzido de dados do curto-circuito considerados pelo algoritmo.

Em uma segunda etapa deste estudo de caso, assume-se a hipótese de um sensor de curto-circuito posicionado no início do ramal afetado pelo defeito. Nessa etapa, a metodologia considera não somente os fasores de tensão e corrente no início do circuito, mas também a detecção de passagem de corrente de falta pelo sensor. Executando novamente a metodologia de LF, obtém-se uma solução de curto-circuito **AG** com  $R_f = 44,32\Omega$ , ilustrada pelo **X** azul da Figura 52. Verifica-se que a solução resultante é muito próxima do local efetivo do defeito (posição ilustrada pelo **X** verde da mesma figura).

Em uma terceira etapa deste estudo de caso, além dos fasores de tensão e corrente efetivamente registrados no início do alimentador, assumem-se as hipóteses:

- Sensor de curto-circuito instalado no início do ramal afetado, indicando a passagem de corrente de defeito;
- □ Medidores de qualidade (ilustrados pela Figura 52) instalados em ambos os ramais do alimentador, fornecendo fasores de tensão durante o curto-circuito;

Considerando essas hipóteses, a metodologia de LF é novamente executada e fornece a solução de localização ilustrada pelo X preto da Figura 52. Ela indica curto-circuito AG com  $R_f = 44,10\Omega$ . Nota-se que esse terceiro resultado de localização é ainda mais próximo do local efetivo da falta, comparado com o resultado da etapa anterior. Isso se deve à utilização de maior quantidade de informações relativas ao evento de curto-circuito.



Figura 52 – Resultados de localização da falta Fonte: autor

### 5.4.4 Considerações

Com base neste estudo de caso, verifica-se que, em situações práticas, dispõe-se de poucas informações relativas ao eventos que afetam os circuitos de média tensão. A baixa disponibilidade de medições prejudica a precisão dos resultados de localização de faltas. Isso ocorre, por exemplo, quando as únicas informações da média tensão são as medições no início do alimentador. Nessas situações, defeitos em posições equidistantes em relação à subestação podem levar a medições muito similares de tensão e corrente no início do alimentador.

A consideração de um sensor de corrente de curto-circuito hipotético, meramente indicando a passagem de corrente de defeito, sugere benefícios aos resultados de localização de faltas. Isso ocorre porque a área de busca do defeito fica restrita aos blocos à jusante do sensor.

Considerando hipoteticamente o sensor de corrente de curto-circuito e dois medidores de qualidade fornecendo medições de tensão durante o defeito, obtém-se resultado de localização muito próximo do local efetivo. O aumento da precisão do resultado se deve à utilização de mais medições para avaliação dos indivíduos do processo evolutivo.

# Capítulo 6

# Conclusão

## 6.1 Desafios para implantação em sistema real

Os sistemas de automação da distribuição vêm se modernizando, através da implantação de chaves automáticas, reguladores de tensão, sensores de curto-circuito, dentre outros equipamentos. Porém, os avanços mais substanciais ocorrem em grandes centros urbanos. Em locais mais afastados do interior do país, o monitoramento das redes de distrubição ainda é incipiente.

O desenvolvimento da metodologia proposta por este trabalho, com implantação no Centro de Operações, deve enfrentar desafios de natureza prática. Em sistemas de distribuição que já possuem equipamentos de campo inteligentes, são necessárias adaptações em seus respectivos sistemas computacionais de interface e coleta de dados. É necessário que eles permitam interações com a metodologia de Localização de Faltas para o fornecimento de medições e outras informações de campo.

Nesses casos de equipamentos de campo pré-existentes, faz-se a ressalva de que foram implantados em campo com outra finalidade, como redução de falha, suporte de reativos, redução de perdas, dentre outras. A instalação de outros equipamentos de monitoramento pode ser necessária, sendo instalados em locais mais adequados para a localização de faltas.

Em sistemas de distribuição com baixo ou nenhum monitoramento, a implantação da metodologia de Localização de Faltas requer a instalação de equipamentos inteligentes de campo, tais como chaves religadoras, sensores de curto-circuito, medidores de qualidade de energia associados a grandes consumidores, dentre outros. Trabalhos futuros podem sugerir metodologias para a alocação ótima dos equipamentos que devem subsidiar a Localização de Faltas. Elas devem se basear em dados como registros de ocorrências de curtos-circuitos, base de topologia das redes primárias e cadastro de equipamentos e consumidores.

A implantação de equipamentos inteligentes de campo pode ser planejada considerando um universo mais amplo de objetivos. No contexto de Redes Elétricas Inteligentes, os novos equipamentos visam a subsidiar não somente a metodologia de Localização de Faltas, mas também as demais funcionalidades e outros automatismos do sistema, tais como: controle Volt-VAr, *Self-Healing* e *Demand Response*.

## 6.2 Adaptações para implantação em sistema real

Com base nos resultados das aplicações da metodologia desenvolvida, nota-se que ela se torna mais efetiva à medida que se aumenta a quantidade de monitoramento da rede. Uma boa condição de monitoramento consiste em: sistemas de comunicação funcionando adequadamente, existência de dispositivos de medição nos locais adequados e integração dos seus respectivos sistemas computacionais coletores de dados.

Em geral, os sistemas de distribuição são caracterizados por redes com baixo monitoramento, muitas ramificações e grandes extensões. As concessionárias de distribuição têm que lidar com altas taxas de falha e tempos de atendimento elevados, de modo a demandarem fortemente metodologias efetivas de Localização de Faltas, com a função de orientar e subsidiar uma decisão acertada para despacho de equipes de manutenção.

Considerando essas condições, inicialmente seria razoável que a metodologia de Localização de Faltas fornecesse mais de um resultado de localização. Como o algoritmo evolutivo fornece apenas uma solução, seria necessária uma adaptação: executar a mesma metodologia considerando como área de busca alguns grupos de blocos que compõem a área de busca original. Então, o operador do sistema de distribuição teria como resposta duas ou mais soluções para a localização de um determinado defeito, tendo maior controle sobre a decisão que deve ser tomada. Note-se que o aumento da quantidade de dispositivos de campo (sensores, medidores, etc) implica a redução da área de busca do defeito. Consequentemente, reduz-se a probabilidade de erro do resultado da localização.

### 6.3 Medidores inteligentes

Conforme indicam os resultados das aplicações da metodologia proposta, medidores inteligentes podem emitir alarmes de falta de tensão, indicando a interrupção do fornecimento de energia. Esses alarmes podem contribuir significativamente para a metodologia de Localização de Faltas por alguns motivos.

Primeiramente, os alarmes emitidos podem representar geograficamente a região cujos consumidores foram afetados pelo defeito, permitindo refinar a área de busca determinada pelas demais informações de campo. Outrossim, se o sistema monitorado não contar com sensores de curto-circuito ou medidores de qualidade, os alarmes emitidos pelos medidores inteligentes de baixa tensão podem ser o único tipo de informação recebida pelo Centro de Operações que permite a detecção da falta. Isso é fundamental em casos de faltas extintas pela atuação de chaves fusíveis, não monitoradas.

# 6.4 Considerações finais

Os sistemas aéreos de distribuição são frequentemente sujeitos a falhas de funcionamento, devido aos mais variados motivos, tais como descargas atmosféricas, quebra de postes, rompimento de cabo e contato de vegetação. Em eventos como esses, os esquemas de proteção atuam e o defeito é rapidamente extinto. Por outro lado, a interrupção do fornecimento de energia pode afetar muitos consumidores, a concessionária pode sofrer piora dos índices de qualidade do serviço e sofrer penalizações. Conclui-se que, nesse contexto, é fundamental desenvolver e implantar metodologias de Localização de Faltas, com os objetivos de reduzir os tempos de atendimento das ocorrências e mitigar as consequências dos defeitos nos sistemas de distribuição.

A metodologia de Localização de Faltas proposta por este trabalho se baseia em testes de curto-circuito e nas grandezas elétricas medidas durante a falta, tornando possível determinar não somente o local da falta, mas também o tipo e a resistência de falta. Como a metodologia consiste em testar diversos defeitos, variando as duas variáveis (posição de falta e resistência de falta), seria necessário um número elevado de testes exaustivos ao longo de todo o espaço de buscas envolvendo aquelas variáveis. Conclui-se que, para a resolução do problema, foi crucial lançar mão de um algoritmo evolutivo, pois permite realizar testes ao longo do espaço de buscas de maneira otimizada, demandando quantidade bem menor de testes de curtos-circuitos.

A avaliação das magnitudes das correntes de falta permite determinar o tipo de falta através de um algoritmo baseado em regras, composto de parâmetros que devem ser previamente calibrados em função das condições de operação do sistema de distribuição monitorado. Verifica-se que isso é necessário pois as magnitudes das correntes de curtocircuito podem apresentar padrões distintos, dependendo de características do sistema de distribuição, tais como: potência de curto-circuito na subestação, comprimento dos alimentadores, características de carregamento e perfil dos consumidores.

Similarmente à determinação dos parâmetros do algoritmo que estima o tipo de falta, é necessária uma etapa prévia para calibração dos parâmetros do algoritmo evolutivo a ser implantado em um determinado sistema de distribuição. Uma combinação adequada desses parâmetros depende das características das redes monitoradas, tais como quantidade de medições, ramificações dos alimentadores, dentre outras.

Durante os testes de avaliação da metodologia, nota-se que o algoritmo evolutivo converge mais rapidamente para os casos em que se considera nula a resistência de falta, em relação aos casos em que é necessário determinar tanto o local quanto a resistência de falta. Nesses últimos, o algoritmo necessita de uma quantidade mais elevada de iterações para atingir a convergência. Verifica-se também que, aumentando-se a quantidade de medições relativas ao evento de curto-circuito, o algoritmo evolutivo fornece resultados mais precisos, pois evita os mínimos locais (ou múltiplas soluções) e caminha em direção à solução procurada. Nos casos mais complexos, em que os defeitos atingem regiões ramificadas do sistema de distribuição, a precisão dos resultados depende da presença de medições nas proximidades ou no interior da área ramificada.

Durante a etapa de testes e aplicações, a metodologia desenvolvida neste trabalho foi avaliada detalhadamente, através da localização de uma quantidade elevada de curtoscircuitos simulados computacionalmente. Verificou-se que a metodologia fornece resultados cujos erros de localização dependem de diversos fatores, tais como tipo de falta e condições de monitoramento.

O efeito da variação das condições de monitoramento foi avaliado através da alteração do número de medições e dos dados considerados pela metodologia. A pior condição de monitoramento ocorre quando se têm medições de tensão e corrente apenas no início do alimentador, o que é verificado na maior parte dos sistemas de distribuição reais. Considerando essa condição de monitoramento, a metodologia proposta apresenta erros de localização, pois defeitos distintos em posições com mesma impedâncias equivalentes (Equivalentes de Thèvènin) podem gerar o mesmo conjunto de medições de tensão e corrente no início do alimentador.

Uma condição intermediária de monitoramento consiste em medições ao longo do alimentador, além daquelas no início do circuito. A aplicação da metodologia para a localização de defeitos simulados permitiu obter resultados com maior precisão, em relação à condição anterior de monitoramento. Em termos práticos, essa segunda condição de monitoramento vem se tornando possível nos sistemas de distribuição pela instalação de equipamentos em campo. São empregados chaves automáticas, religadores, sensores de curto-circuito, dentre outros equipamentos. Verifica-se, porém, a necessidade de integrar os sistemas de aquisição desses equipamentos ao sistema que executa a metodologia de Localização de Faltas.

Uma terceira condição de monitoramento consiste nas medições no início do alimentador, medições ao longo dele e alarmes de falta de tensão emitidos por medidores inteligentes de consumidores média e baixa tensão. Aplicando a metodologia proposta para localizar defeitos simulados, verificou-se que os resultados apresentam maior precisão, em relação às duas outras condições de monitoramento.

Em termos práticos, não se tem conhecimento de implantação massiva de medidores inteligentes. Porém, nota-se a tendência de avanço dos sistemas de medição inteligente, de modo que essa terceira condição de monitoramento pode ser viabilizada. A utilização dos alarmes de falta de tensão pode ser fundamental para localizar faltas em sistemas de distribuição com baixo nível de monitoramento e também em casos de defeitos extintos por chaves fusíveis, situações em que esses alarmes são a única informação de campo recebida pelo Centro de Operações.

A aplicação da metodologia aos estudos de casos evidenciam os desafios que seriam enfrentados pela implantação da metodologia em um sistema real de distribuição atualmente: escassez de dados e medições relativos ao evento de curto-circuito. Nota-se também a necessidade de algumas adaptações da metodologia para que se adeque aos sistemas existentes.

Primeiramente, conclui-se que é necessário um módulo para tratamento das medições dos equipamentos de campo, pois elas podem estar afetados por erros de conexão e também por ruídos decorrentes dos sistemas de comunicação. Além disso, enquanto as concessionárias não dispuserem de mais equipamentos de monitoramento, pode-se adotar a estratégia de se dividir a área de busca em grupos de blocos e executar a metodologia para cada grupo. Com isso, o operador do sistema de distribuição rapidamente toma conhecimento do curto-circuito detectado e a metodologia de Localização de Faltas fornece dois ou mais possíveis locais do defeito, auxiliando a tomada de decisão.

### 6.4.1 Trabalhos futuros

Trabalhos futuros abordando o tema de Localização de Faltas podem tratar da preparação dos sistemas convencionais de distribuição para que permitam a implantação e o desenvolvimento de automatismos e funcionalidades de Redes Elétricas Inteligentes, como Localização de Faltas. Pode-se propor, por exemplo, uma metodologia para alocação ótima de monitores (sensores de corrente e medidores de tensão e corrente). O objetivo seria otimizar a posição desses equipamentos ao longo dos alimentadores, de modo a minimizar os erros de localização.

Outro campo de investigação consiste na integração dos sistemas computacionais envolvidos na metodologia de Localização de Faltas. Trabalhos futuros podem versar sobre arquiteturas orientadas a serviços, sugerindo as implementações mais adequadas para viabilizar a implantação das funcionalidades de Redes Elétricas Inteligentes.

### 6.4.2 Publicações

A metodologia de localização de faltas baseada em algoritmo evolutivo foi publicada em dois artigos, sendo um enviado para revista e outro para congresso:

- Algoritmo Evolutivo para Localização de Faltas em Redes Elétricas Inteligentes (PEREIRA; ALMEIDA; KAGAN, 2018);
- □ Fault Location in the Smart Grids Context Based on an Evolutionary Algorithm (PEREIRA; KAGAN; ALMEIDA, 2018);

# Referências

ABUSDAL, G. M. Detection of Back-Fed Ground Faults Using Smart Grid Distribution Technology. Thesis (PhD) — Ira A. Fulton Schools of Engineering Arizona State University, 2014.

ABUSDAL, G. M.; HEYDT, G. T.; RIPEGUTU, A. Utilization of advanced metering infrastructure in back-fed ground fault detection. In: IEEE POWER & ENERGY SOCIETY GENERAL MEETING. **Proceedings...** [S.l.], 2015. p. 1–5. ISSN 1932-5517.

AES-ELETROPAULO. **Projeto Redes Inteligentes - Smart Grid**. 2017. Disponível em: <a href="http://www.smartgridaeseletropaulo.com.br/Paginas/Home.aspx">http://www.smartgridaeseletropaulo.com.br/Paginas/Home.aspx</a>>. Acesso em: 19.08.2017.

ARRUDA, E. F. Estimação de Estados de Distorções Harmônicas em Sistemas Elétricos de Potência Utilizando Estratégias Evolutivas. Tese (Doutorado) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2008.

BACK, T.; HAMMEL, U.; SCHWEFEL, H. P. Evolutionary computation: Comments on the history and current state. **IEEE Transactions on Evolutionary Computation**, IEEE, p. 3–17, Apr 1997. ISSN 1089-778X.

BORLASE, S. Smart Grids: Infrastructure, Technology, and Solutions. [S.l.]: CRC Press, 2016. ISBN 978-1-4398-2910-3.

CAPELINI, R. M. et al. Methodology for fast fault location in overhead distribution networks by the application of temporary georeferenced fault indicators. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON HIGH VOLTAGE ENGINEERING AND APPLICATION. **Proceedings...** Chengdu, 2016. p. 1–4.

CORDOVA, J.; FARUQUE, M. O. Fault location identification in smart distribution networks with distributed generation. In: NORTH AMERICAN POWER SYMPOSIUM. **Proceedings...** Charlotte, 2015. p. 1–7.

DUGAN, R. C. Modeling single-phase, center-tapped distribution transformers. 2015. Disponível em: <a href="https://github.com/tshort/OpenDSS/blob/master/Distrib/Doc/TechNotes/TechNote\%20Modeling\%20Single-phase\%2C\%20Center-tapped\%20Distribution\%20Transformers\%20-\%20OpenDSSWiki.pdf>">https://github.com/tshort/OpenDSS/blob/master/Distrib/</a> Doc/TechNotes/TechNote\%20Modeling\%20Single-phase\%2C\%20Center-tapped\%20Distribution\%20Transformers\%20-\%20OpenDSSWiki.pdf>">https://github.com/tshort/OpenDSS/blob/master/Distrib/</a> Doc/TechNotes/TechNote\%20Modeling\%20Single-phase\%2C\%20Center-tapped\%20Distribution\%20Transformers\%20-\%20OpenDSSWiki.pdf>">https://github.com/tshort/OpenDSSWiki.pdf</a> Acesso em: 02.06.2017.

EDP (Energias de Portugal). **Inovcity**. 2017. Disponível em: <a href="http://www.edp.com">http://www.edp.com</a>. br/distribuicao/edp-bandeirante/projetos/inovcity/welcome/index.html>. Acesso em: 19.08.2017.

EPRI (Electric Power Research Institute). **Reference guide - The Open Distribution System Simulator (OpenDSS)**. 2015. Disponível em: <a href="https://github.com/tshort/OpenDSS/blob/master/Distrib/Doc/OpenDSSManual.pdf">https://github.com/tshort/OpenDSS/blob/master/Distrib/Doc/OpenDSSManual.pdf</a>>. Acesso em: 02.06.2017.

ERLINGHAGEN, P. et al. Comparison of dynamic simulations and steady-state calculations of fault currents in distribution grids with high dg penetration. In: INTERNATIONAL ETG CONGRESS. **Proceedings...** Bonn, 2015. p. 1–6.

GABRIEL, P. H. R.; DELBEM, A. C. B. Fundamentos de algoritmos evolutivos. 2008. Notas Didáticas do ICMC-USP, ISSN 0103-2585, No. 75.

GALIJASEVIC, Z.; ABUR, A. Fault location using voltage measurements. **IEEE Transactions on Power Delivery**, p. 441–445, Apr 2002. ISSN 0885-8977.

GIRGIS, A. A.; FALLON, C. M. Fault location techniques for radial and loop transmission systems using digital fault recorded data. **IEEE Transactions on Power Delivery**, IEEE, p. 1936–1945, Oct 1992. ISSN 0885-8977.

HOLLAND, J. H. Adaptation in Natural and Artificial Systems. [S.l.]: University of Michigan Press, 1975.

MANASSERO, G.; SANTO, S. G. D.; SOUTO, L. Heuristic method for fault location in distribution feeders with the presence of distributed generation. **IEEE Transactions on Smart Grid**, IEEE, v. 8, n. 6, p. 2849–2858, Nov 2017. ISSN 1949-3053.

MANASSERO, G.; TAKEDA, V.; FREITAS, P. R. R. Algoritmo para localização de faltas em redes de distribuição de energia elétrica com a presença de unidades de geração distribuída. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICITY DISTRIBUTION. **Proceedings...** Buenos Aires, 2014. p. 1–6.

NEVES, L. C.; BAGAROLLI, A. Os desafios da implementação dos projetos-piloto de smart grid no brasil. **Cad. CPqD Tecnologia, Campinas**, p. 15–22, 2013. ISSN 1809-1946.

NIE, S. et al. Analysis of the impact of dg on distribution network reconfiguration using opendss. In: IEEE PES INNOVATIVE SMART GRID TECHNOLOGIES. **Proceedings...** Tianjin, 2012. p. 1–5. ISSN 2378-8534.

PARKER, D.; HARLEV, Y.; PRESOTTO, D. Optical mv current & voltage sensors as a new generation instrument transformer for distribution automation. In: IEEE PES INNOVATIVE SMART GRID TECHNOLOGIES. **Proceedings...** Washington D.C., 2012. p. 1–3.

PARKER, D. M.; MCCOLLOUGH, N. D. Medium-voltage sensors for the smart grid: Lessons learned. In: IEEE POWER AND ENERGY SOCIETY GENERAL MEETING. **Proceedings...** Detroit, 2011. p. 1–7. ISSN 1932-5517. PEREIRA, D.; ALMEIDA, C.; KAGAN, N. Algoritmo evolutivo para localização de faltas em redes elétrica inteligentes. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA (CBA), 22. Anais... João Pessoa, 2018. p. 1–6. ISSN 2525-8311.

PEREIRA, D.; KAGAN, N.; ALMEIDA, C. Fault location in the smart grids context based on an evolutionary algorithm. Journal of Control, Automation and Electrical Systems, Springer, v. 29, n. 5, p. 640–649, 2018. ISSN 2195-3880.

SENGER, E. D. et al. Automated fault location system for primary distribution networks. **IEEE Transactions on Power Delivery**, p. 1332–1340, Apr 2005. ISSN 0885-8977.

TAKAGI, T. et al. Development of a new type fault locator using the one-terminal voltage and current data. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, PAS-101, n. 8, p. 2892–2898, Aug 1982. ISSN 0018-9510.

TREMBLAY, M. et al. Accurate fault-location technique based on distributed powerquality measurements. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICITY DISTRIBUTION, 19. **Proceedings...** Viena, 2007.

TRINDADE, F. C. L. et al. Fault location in distribution systems based on smart feeder meters. **IEEE Transactions on Power Delivery**, IEEE, p. 251–260, Jul 2014. ISSN 1932-5517.

ZAVODA, F. Advanced distribution automation (ada) applications and power quality in smart grids. In: CHINA INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICITY DISTRIBUTION. **Proceedings...** Nanjing: IEEE, 2010. p. 1–7. ISSN 2161-7481.

ZHU, J.; LUBKEMAN, D. L.; GIRGIS, A. A. Automated fault location and diagnosis on electric power distribution feeders. **IEEE Transactions on Power Delivery**, IEEE, p. 801–809, April 1997. ISSN 0885-8977.

ZUBEN, F. J. V. Computação evolutiva: uma abordagem pragmática. In: JORNADA DE ESTUDOS EM COMPUTAÇÃO DE PIRACICABA E REGIÃO, 1. Anais... [S.l.], 2000. p. 25–45.

ZVIETCOVICH, W. G. Estimador de variações de tensão de curta duração em sistemas elétricos de potência utilizando estratégias evolutivas. Tese (Doutorado) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2011.

ZVIETCOVICH, W. G.; KAGAN, N. Fault location and voltage estimation in transmission systems by evolutionary algorithms. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT SYSTEM APPLICATIONS TO POWER SYSTEMS, 15. **Proceedings...** Curitiba, 2009. p. 1–5.

# APÊNDICE A

# **OpenDSS**

# A.1 Introdução

O OpenDSS é um *software opensource* (de código-fonte aberto), mantido pelo EPRI (*Electric Power Research Institute*), para a simulação de redes elétricas de distribuição. Ele faz cálculos elétricos para o regime permanente e é capaz de representar os componentes das redes elétricas a partir dos seus modelos por fase. Nessa representação, o OpenDSS modela trechos de linha, carga e geradores a partir do conceito de fases. Em seus cálculos, gera uma matriz de rede considerando os parâmetros de fase inseridos pelo usuário (NIE et al., 2012).

O software pode ser operado em sua própria janela a partir de scripts de sintaxe própria. Pode também ser operado por software terceiro, através da interface COM, o que lhe confere certa flexibilidade de operação e análises. Os softwares terceiros, com o objetivo de controlar o OpenDSS, podem ser escritos em Mathworks Matlab, Microsoft VBA, Python e C# (ABUSDAL, 2014). A interface permite que os terceiros construam objetos que controlem o processo de simulação.

# A.2 Modos de execução

O principal objetivo do OpenDSS é resolver um sistema matricial, que equivale a determinar as tensões e correntes nos diversos pontos da rede simulada. Ele permite, porém, resolver o circuito segundo alguns modos de resolução: **direct**, **snapshot**, **dynamics**, dentre outros (ABUSDAL, 2014).

### Direct

O modo de execução *Direct* resolve o circuito em apenas uma iteração, determinando os fasores de tensão do sistema  $I = [Y] \cdot V$ , considerando que as correntes injetadas são as nominais.

### $\Box$ SnapShot

Este é o modo de execução padrão do OpenDSS. É iterativo e considera o patamar de carga corrente, levando em conta os modelos das cargas  $(I_{cte}, P_{cte} \text{ ou } Z_{cte})$ . O software fornece tela de logs para avaliar eventual não convergência do cálculo.

**D**ynamics

Permite considerar a dinâmica dos geradores, com relação aos aspectos mecânicos. Esse modo é o mais adequado para estudos de curto-circuito, pois representa melhor as contribuições dos geradores para o defeito.

## A.3 Modelagem de equipamentos

### A.3.1 Modelo de cargas

O simulador OpenDSS considera cargas como elementos de conversão de energia. As cargas são definidas por uma das duplas: (KW, PF), (KW, KVAR) ou (KVA, PF), onde KW é a potência ativa nominal, KVAR é a potência reativa nominal e PF, o fator de potência. As cargas são supostas balanceadas. Caso se queira uma carga desequilibrada, basta adicionar uma carga monofásica para cada fase considerada (EPRI (Electric Power Research Institute), 2015).

São implementados alguns modelos de carga:

- $\Box$  Modelo 1: P constante e Q constante (*default*)
- $\hfill\square$ Modelo 2: Z constante
- □ Modelo 3: P constante e Q quadrático

□ Modelo 4: P linear nominal e Q quadrático

- □ Modelo 5: I de módulo constante
- **D** Outros

Alguns parâmetros importantes do objeto de carga são:

- $\square$ bus<br/>1: barra (ou nó) ao qual a carga está conectada
- $\hfill\square$ kV: tensão nominal em kV
- □ Vminpu: mínima tensão, em pu da tensão nominal, para a qual o modelo de carga se aplica. Para tensões menores, considera-se o modelo de impedância constante.
- □ Vmaxpu: máxima tensão, em pu da tensão nominal, para a qual o modelo de carga se aplica. Para tensões maiores, considera-se o modelo de impedância constante.

É importante notar que, em situações de curto-circuito, as tensões dos nós atingem valores muito baixos, dificultando a convergência do fluxo de potência. Assim, as cargas têm seu modelo convertido para impedância constante, de modo que sua admitância fica agregada na matriz de admitâncias da rede simulada (EPRI (Electric Power Research Institute), 2015).

### A.3.2 Modelo de transformadores

### A.3.2.1 Definições gerais

O objeto de transformador, no OpenDSS, pode ser definido com 2 ou mais terminais (enrolamentos), em cujas conexões podem ser quaisquer. Para um determinado enrolamento, são definidas propriedades. As principais são:

Bus: barra (ou nó) ao qual o terminal está conectado.

□ Conn: tipo de conexão do terminal, podendo ser: *delta* (Delta) ou *wye* (Estrela).

 $\Box$  kV: tensão nominal, em kV, do enrolamento.

 $\hfill\square$  kVA: potência de base, em kVA, do enrolamento

 $\square$  %R: resistência, em %, do enrolamento.

De modo separado, são definidas as reatâncias XHL, XHT e XLT, em valores porcentuais com base na impedância de base, onde:

 $\hfill\square$ XHL: reatância de curto-circuito envolvendo o enrolamento 1 e o enrolamento 2

 $\hfill\square$ XHT: reatância de curto-circuito envolvendo o enrolamento 1 e o enrolamento 3

 $\hfill\square$ XLT: reatância de curto-circuito envolvendo o enrolamento 2 e o enrolamento 3

A modelagem das perdas em vazio e da corrente de magnetização é feita por: %Noloadloss e %imag, respectivamente. O primeiro parâmetro é a perda em vazio, em relação à potência nominal, com tensão nominal. O segundo parâmetro é a corrente de magnetização, em relação à corrente nominal por fase.

### A.3.2.2 Transformador monofásico com tap central

São comuns, nos sistemas de distribuição da América do Norte e no Brasil, transformadores de distribuição monofásicos com tap central, formando uma rede de baixa tensão a 3 fios, sendo 2 fases e um neutro (110/220 V).

O OpenDSS não tem, a princípio, um modelo específico para esse tipo de conexão. Porém, emprega-se o procedimento ilustrado pela Figura 53. Segundo ela, considera-se este transformador como sendo de 3 enrolamentos. O primeiro é conectado entre uma fase e a terra (ou entre 2 fases). O segundo terminal é conectado entre uma fase e o terra. O terceiro terminal é conectado entre o terra e a outra fase, nesta ordem Dugan (2015).



Figura 53 – Modelagem no OpenDSS para transformador de tap central Fonte: (DUGAN, 2015)

# A.4 Controle via Interface COM

O *software* OpenDSS fornece uma grande variedade de objetos e parâmetros para modelagem da rede. Porém, não existem funcionalidades que permitam scripts em *loop*. Essas funcionalidades são muito desejáveis e necessárias para metodologias de otimização, alocação de equipamentos, estimação de estados, dentre outras. A interface COM para o simulador foi desenvolvida com o objetivo de viabilizar o controle da simulação a partir de um código terceiro (EPRI (Electric Power Research Institute), 2015).

Como exemplo, tomemos o *script* em Python ilustrado pela Figura 54. Na linha 1, importamos um client para a interface COM. Na linha 3, cria-se um objeto OpenDSSEngine, representando o OpenDSS ao longo dos scripts. Nas linhas 5-9, são geradas referências para alguns objetos de controle da simulação.

O objeto **dssText**, por exemplo, permite enviar comandos de texto para o OpenDSS. Isso é feito na linha 11, enviando comando de "compile" do arquivo "testCircuit.dss" para o simulador. Por fim, na linha 13 temos o comando para resolver a rede descrita por aquele arquivo.

```
import win32com.client
2
3
      dssObj = win32com.client.Dispatch("OpenDSSEngine.DSS")
 4
5
      dssText = dssObj.Text
6
7
      dssCircuit = dssObj.ActiveCircuit
      dssSolution = dssCircuit.Solution
8
      dssElem = dssCircuit.ActiveCktElement
9
      dssBus = dssCircuit.ActiveBus
      dssText.Command = "compile `testCircuit.dss'"
11
13
      dssSolution.Solve()
```



A estrutura de objetos e parâmetros da interface para o OpenDSS pode ser analisada com detalhes carregando a biblioteca "OpenDSSEngine" no Microsoft VBA, como ilustra a Figura 55.

📲 Object Browser						
OpenDSSengine V () B 2 ?						
	-					
	_					
Classes		Members of 'DSS'				
Capacitors	^	ActiveCircuit	^			
P CapControlModes		ActiveClass				
CapControls		AllowForms				
A Circuit		Circuits				
🖾 CktElement		Classes				
🖾 CmathLib		ClearAll				
CtrlQueue		CmathLib				
💐 DSS		DataPath DataPath				
DSS_Executive		DefaultEditor				
DSSElement		DSSim_Coms				
DSSEvents		DSSProgress				
🖾 DSSimComs		Error				
🖾 DSSProgress		Events				
🖾 DSSProperty		Executive				
🖏 Error		NewCircuit				
🖾 Fuses		The second secon				
🛃 Generators		I NumClasses				
ISources		NumUserClasses				
🛃 Lines		Parser				
P LineUnits		eset eset				
P LoadModels		SetActiveClass				
🛃 Loads		ShowPanel				
🖾 LoadShapes		Start				
P LoadStatus		m Text				
Meters	¥	UserClasses	~			
Class DSS						
Member of OpenDSSengine						
DSS Main Object						
			×			

Figura 55 – Objetos e parâmetros da interface para o OpenDSS, via Microsoft VBA. Fonte: (EPRI (Electric Power Research Institute), 2015)