



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas
Colegiado do Curso de Engenharia de Elétrica



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E APLICADAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**Localização de Falhas em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica
Utilizando Otimização por Nuvens de Partículas e Busca em
Vizinhança Variável**

Paulo Cesar Ferreira Freitas

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

JOÃO MONLEVADE

2017

Universidade Federal de Ouro Preto
Departamento de Engenharia Elétrica

Localização de Falhas em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica Utilizando Otimização por Nuvens de Partículas e Busca em Vizinhança Variável

Paulo Cesar Ferreira Freitas

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Dr. Wilingthon Guerra Zvietcovich

João Monlevade, MG

2017

F8661

Freitas, Paulo Cesar Ferreira.

Localização de faltas em sistemas de distribuição de energia elétrica utilizando otimização por nuvens de partículas e busca em vizinhança variável [manuscrito] / Paulo Cesar Ferreira Freitas. - 2017.

84f.:

Orientador: Prof. Dr. Wilingthon Guerra Zvietcovich.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas. Departamento de Engenharia Elétrica.

1. Engenharia Elétrica. 2. Energia elétrica - Distribuição. 4. Localização de falhas (Engenharia). 5. Energia Elétrica - Medição. I. Zvietcovich, Wilingthon Guerra. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 621.31

Catálogo: ficha@sisbin.ufop.br



ANEXO IV - ATA DE DEFESA

Aos 18 dias do mês de Janeiro de 2017, às 17 horas, no bloco B¹⁰³, sala deste instituto, foi realizada a defesa de monografia pelo (a) formando (a) **Paulo César Ferreira Freitas**, sendo a comissão examinadora constituída pelos professores: Prof. Dr. Wilington Guerra Zvietcovich, Prof. Dr. Victor Costa da Silva Campos e Prof. Sc.M.. Francisco Ricardo Abrantes Couy Baracho.

O (a) candidato (a) apresentou a monografia intitulada: **Localização de Falhas em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica Utilizando Otimização por Nuvens de Partículas e Busca em Vizinhança Variável**. A comissão examinadora deliberou, por unanimidade, pela APROVAÇÃO do(a) candidato(a), com a nota média 9,3, de acordo com a tabela 1. Na forma regulamentar foi lavrada a presente ata que é assinada pelos membros da comissão examinadora e pelo (a) formando(a).

Tabela 1 – Notas de avaliação da banca examinadora

Banca Examinadora	Nota
Prof. Dr. Wilington Guerra Zvietcovich	9,2
Dr. Victor Costa da Silva Campos	9,2
Prof. Sc.M.. Francisco Ricardo Abrantes Couy Baracho	9,5
Média	9,3

João Monlevade, 18 de Janeiro de 2017

Prof. Dr. Wilington Guerra Zvietcovich
Professor(a) Orientador(a)

Paulo César Ferreira Freitas
Aluno (a)

Dr. Victor Costa da Silva Campos
Professor(a) Convidado(a)

Sc.M.. Francisco Ricardo Abrantes Couy Baracho
Professor(a) Convidado(a)



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas
Colegiado do Curso de Engenharia de Elétrica



ANEXO X - TERMO DE RESPONSABILIDADE

O texto do trabalho de conclusão de curso intitulado “Localização de Faltas em Sistema de Distribuição de Energia Elétrica Utilizando Otimização por Nuvens de Partículas e Busca em Vizinhança Variável” é de minha inteira responsabilidade. Declaro que não há utilização indevida de texto, material fotográfico ou qualquer outro material pertencente a terceiros sem a devida citação ou consentimento dos referidos autores.

João Monlevade, 24 de janeiro de 2017 .

Paulo Cesar Ferreira Freitas
Nome completo do(a) aluno(a)

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus por me dar sabedoria para enfrentar todas as dificuldades encontradas ao longo desta caminhada.

À minha família, que me deu todo suporte para chegar até aqui.

Aos amigos, pelo apoio e compreensão, principalmente nos momentos de ansiedade que antecederam as avaliações.

Aos professores, que dedicaram tempo e esforço para compartilhar um pouco do seu conhecimento. Em especial ao professor Prof. Wilingthon Guerra Zvietcovich, meu orientador de diversas atividades acadêmicas e desta monografia.

Resumo

Este trabalho consiste no desenvolvimento de um algoritmo computacional aplicado à localização de faltas em sistemas de distribuição de energia. Para isso, são utilizadas as informações da operação da rede elétrica, tanto em regime permanente, quanto no instante da ocorrência da falta elétrica. Sendo a informação proveniente dos canais dos medidores importante, para localizar uma determinada falta. Foram considerados três tipos de falta: monofásica, bifásica e trifásica com um valor de impedância de defeito. Para resolver este problema, foram utilizadas as Metaheurísticas Otimização por Nuvens de Partículas e Busca em Vizinhança Variável. Nas simulações são avaliados a precisão e custo computacional de utilização desta metodologia. As redes testadas, de 33 barras, 136 barras e, 202 barras, demonstram a viabilidade de aplicação da metodologia para em seguida testar uma rede de maior porte.

Palavras-chave: Sistemas de distribuição, Otimização por Nuvem de Partículas, Busca em Vizinhança Variável, localização de faltas.

Abstract

This work consists in the development of an applied computational algorithm to the location of faults in power distribution systems. In order to develop this algorithm, information regarding the power grid operation is used, either on a permanent basis or the instant of the electrical fault. Several types of faults are considered: single-phase, two-phase and three-phase fault with a fault impedance value. In order to solve this problem, Particle Swarm Optimization and Variable Neighborhood Search techniques are used. In simulations, Accuracy and computational cost of using this methodology are evaluated. The methodology applied to the networks of 33 bars, 136 bars and 202 bars, to demonstrate its feasibility and afterwards is tested on a larger network.

Key words: Distribution systems, Particle swarm optimization, Variable Neighborhood Search, Fault location.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Modelo de uma Rede de Distribuição.	7
Figura 2 – Chave Fusível	8
Figura 3 – Religador Automático	9
Figura 4 – Seccionador	9
Figura 5 – Disjuntor com relé de proteção de sobrecorrente	10
Figura 6 – Relé de Proteção Digital	10
Figura 7 – Modelo linha curta.	11
Figura 8 – Representação das cargas.	12
Figura 9 – Representação Seção Pai-Filho.	16
Figura 10 – Diagrama Método BFS Fluxo de Potência.	19
Figura 11 – curto-circuito trifásico	22
Figura 12 – Modelo de curto-circuito trifásico.	23
Figura 13 – Modelo de Curto-Circuito fase-terra.	25
Figura 14 – Modelo Curto dupla-fase.	26
Figura 15 – Modelo de um Curto dupla-fase-terra.	27
Figura 16 – Algoritmo para cálculo de curto-circuito.	28
Figura 17 – Fluxograma do Método ONP.	33
Figura 18 – Algoritmo VNS para um problema de minimização.	39
Figura 19 – Relés para medição dos fasores de tensão e corrente.	42
Figura 20 – Estrutura de um relé digital.	43
Figura 21 – Medição sincronizada.	45
Figura 22 – Rede de Distribuição para Exemplo.	46
Figura 23 – Algoritmo ONP para Localização.	51
Figura 24 – Algoritmo VNS para Localização.	54
Figura 25 – Rede de 33 barras.	55
Figura 26 – Rede 33 barras.	56
Figura 27 – Solução 1: a) ONP b) VNS	57
Figura 28 – Solução 2: a) ONP b) VNS	58
Figura 29 – Rede 33 barras.	58
Figura 30 – Solução 1: a) ONP b) VNS	59
Figura 31 – Solução 2: a) ONP b) VNS	60
Figura 32 – Rede de 136 Barras	61
Figura 33 – Solução 1: a) ONP b) VNS	62
Figura 34 – Solução 1: a) ONP b) VNS	63
Figura 35 – Solução 2: a) ONP b) VNS	64
Figura 36 – Rede de 202 Barras	65

Figura 37 – Solução 1: a) ONP b) VNS	67
Figura 38 – Solução 1: a) ONP b) VNS	68
Figura 39 – Solução 1: a) ONP b) VNS	69
Figura 40 – Solução 1: a) ONP b) VNS	70

Lista de tabelas

Tabela 1 – Ocorrências de Curto-Circuito	20
Tabela 2 – Expressões para minimizar	34
Tabela 3 – Geração inicial das partículas	35
Tabela 4 – Avaliação da função objetivo	35
Tabela 5 – Atualização da velocidade	36
Tabela 6 – Atualização da posição	36
Tabela 7 – Resultados da minimização aplicando ONP	37
Tabela 8 – Resultados da minimização aplicando VNS	41
Tabela 9 – Montagem de Ztrecho	46
Tabela 10 – Geração Aleatório das Partículas	48
Tabela 11 – Geração Aleatório Velocidades	49
Tabela 12 – Valores de tensão reais e medidos	49
Tabela 13 – Valores de corrente reais e medidos	49
Tabela 14 – Avaliação da função objetivo para cada partícula e tipo de curto	50
Tabela 15 – Estruturas e definição de vizinhos	52
Tabela 16 – Avaliação de $f(s_0)$	52
Tabela 17 – Soluções vizinhas para $N^1(s)$	53
Tabela 18 – Avaliação da função objetivo para cada partícula e tipo de curto	53
Tabela 19 – Atualização da solução corrente	53
Tabela 20 – Informações Registradas pelos Medidores	56
Tabela 21 – Resultados do Teste 1- Rede de 33 Barras por ONP	56
Tabela 22 – Resultados do Teste 1- Rede de 33 Barras por VNS	57
Tabela 23 – Informações Registradas pelos Medidores	59
Tabela 24 – Resultados do Teste 2- Rede de 33 barras por ONP	59
Tabela 25 – Resultados do Teste 2- Rede de 33 barras por VNS	59
Tabela 26 – Análise do caso 33 barras - ONP	60
Tabela 27 – Análise do caso 33 barras - VNS	60
Tabela 28 – Informações Registradas pelos Medidores	61
Tabela 29 – Resultados do Teste 3 - Rede de 136 Barras por ONP	62
Tabela 30 – Resultados do Teste 3 - Rede de 136 Barras por VNS	62
Tabela 31 – Informações Registradas pelos Medidores	62
Tabela 32 – Resultados do Teste 4 - Rede de 136 Barras por ONP	63
Tabela 33 – Resultados do Teste 4 - Rede de 136 Barras por VNS	63
Tabela 34 – Análise do caso 136 barras - ONP	64
Tabela 35 – Análise do caso 136 barras - VNS	64
Tabela 36 – Informações Registradas pelos Medidores	66

Tabela 37 – Resultados do Teste 5 - Rede de 202 Barras por ONP	66
Tabela 38 – Resultados do Teste 5 - Rede de 202 Barras por VNS	66
Tabela 39 – Informações Registradas pelos Medidores	67
Tabela 40 – Resultados do Teste 6 - Rede de 202 Barras por ONP	67
Tabela 41 – Resultados do Teste 6 - Rede de 202 Barras por VNS	67
Tabela 42 – Informações Registradas pelos Medidores	68
Tabela 43 – Resultados do Teste 7 - Rede de 202 Barras por ONP	69
Tabela 44 – Resultados do Teste 7 - Rede de 202 Barras por VNS	69
Tabela 45 – Análise do caso 202 barras - ONP	70
Tabela 46 – Análise do caso 202 barras - VNS	70
Tabela 47 – Rede de 33 barras	75
Tabela 48 – Rede de 136 barras	76
Tabela 49 – Continuação da Rede de 136 barras	77
Tabela 50 – Continuação da Rede de 136 barras	78
Tabela 51 – Continuação Rede de 136 barras	79
Tabela 52 – Rede de 202 barras	80
Tabela 53 – Rede de 202 barras	81
Tabela 54 – Continuação da Rede de 202 barras	82
Tabela 55 – Continuação da Rede de 202 barras	83
Tabela 56 – Continuação da Rede de 202 barras	84

Lista de abreviaturas

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BSF	Backward-Forward Sweep
CDF	Concentrador de Dados Fasoriais
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile Communications
GVNS	General Variable Neighborhood Search
IED	Dispositivo Lógico Inteligente
PSO	Particle Swarm Optimization
QEE	Qualidade de Energia Elétrica
RNA's	Redes Neurais Artificiais
RVNS	Reduced Variable Neighborhood Search
SVM	Support vector machine
TC	Transformador de Corrente
TP	Transformador de Potência
UMF	Unidade de Medição Fasorial
VND	Variable Neighborhood Descent
VNS	Variable Neighborhood Search

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Objetivo e Motivação	3
1.2	Organização do Trabalho	3
1.3	Revisão Bibliográfica	4
2	SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO	7
2.1	Redes de distribuição	7
2.2	Dispositivos de Proteção do Sistema de Distribuição	8
2.3	Modelagem de uma Rede de Distribuição para Análise de Fluxo de Carga e de Curto-Circuito	11
2.3.1	Modelo Linha Curta	11
2.4	Modelos de carga	12
2.4.1	Cargas de Potência Constante	12
2.4.2	Cargas de Corrente Constante	13
2.4.3	Cargas de Impedância Constante	13
2.4.4	Modelo Combinado de Carga	14
3	FLUXO DE POTÊNCIA E ANÁLISE DE CURTO-CIRCUITO PARA REDES DE DISTRIBUIÇÃO	15
3.1	Fluxo de Potência	15
3.1.1	Método de Varredura Backward-Forward Sweep Trifásio	15
3.1.2	Fluxo de Potência Trifásico pelo Método Backward-Forward Sweep	16
3.1.3	Algoritmo Backward-Forward Sweep	19
3.2	Análise de Curto-Circuito	20
3.2.1	Corrente de defeito transitório e permanente	20
3.2.2	Componentes Simétricas	21
3.2.3	Modelagem de um Curto-Circuito Trifásico	22
3.2.4	Modelagem de um Curto-Circuito Fase-Terra	24
3.2.5	Modelagem de um Curto-Circuito Dupla-Fase BC	25
3.2.6	Modelagem de um Curto-Circuito Dupla-Fase BCT	27
3.2.7	Algoritmo para Cálculo de Curto-Circuito	28
4	METODOLOGIAS	30
4.1	Otimização Por Nuvem de Partícula	30
4.1.1	Fundamentos básicos	30
4.1.2	Aplicação da ONP para minimização de funções	34

4.2	Variable Neighborhood Search - VNS	38
4.2.1	Fundamentos Básicos	38
4.2.2	Aplicação da VNS para minimização de funções	40
5	APLICAÇÃO DAS TÉCNICAS VNS E ONP PARA SOLUÇÃO DOS PROBLEMAS DE LOCALIZAÇÃO	42
5.1	Medições	42
5.1.1	Medição de tensão e corrente	43
5.1.2	Medição Sincronizada	44
5.2	Codificação das Variáveis	45
5.3	Função Objetivo para o Problema de Localização de Falta	47
5.4	Aplicação de ONP ao Problema de Localização	48
5.5	Aplicação de VNS ao problema de Localização	52
6	TESTES E RESULTADOS	55
6.1	Rede de 33 barras	55
6.2	Rede de 136 Barras	60
6.3	Rede de 202 Barras	65
7	CONCLUSÕES	71
7.1	Sugestões de Trabalhos Futuros	72
	Referências	73

1 Introdução

Manter o fornecimento de energia elétrica em conformidade com as normas de Qualidade de Energia Elétrica (QEE) é uma necessidade das empresas distribuidoras de energia elétrica, a qual cria desafios para estas empresas. As normas foram criadas pela Agência Nacional de Energia Elétrica -ANEEL. Esta agência é encarregada da regulamentação e fiscalização dos serviços de energia elétrica, de forma a garantir que os consumidores sejam atendidos com uma tarifa justa e com uma QEE adequada (KAGAN; ROBBA; SCHMIDT, 2009). Um dos parâmetros que avaliam a QEE é referente a qualidade do serviço, estabelecido nos Procedimentos de Distribuição PRODIST modulo 8. A resolução ANEEL 024/2000 estabelece os indicadores correspondentes à qualidade de Serviço, sendo os seguintes:

- DEC - Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora;
- FEC - Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora;
- DIC - Duração de Interrupção por Unidade Consumidora;
- DMIC - Duração da Interrupção individual por Unidade Consumidora.

Frequentemente ocorrem interrupções no fornecimento de energia elétrica devido à manutenção preventiva ou corretiva no sistema elétrico, afetando os indicadores de QEE. As interrupções por manutenção preventiva ocorrem de forma planejada, assim, já é esperado um tempo de interrupção e o grupo de consumidores atingidos. As interrupções por manutenção corretiva por sua vez ocorrem em pontos aleatórios do sistema elétrico, causados por faltas elétricas. Alguns exemplos que podem causar essas faltas são: pelo contato da linha com árvores, pelo rompimento de cabos, pelo mau funcionamento de equipamentos, entre outras causas. Elas podem acionar o circuito de proteção causando interrupção de energia em um grupo de consumidores (KINDERMANN, 1997). Desta forma, os sistemas de distribuição estão expostos a faltas, sendo que a maioria são provocadas por curto-circuitos (KAGAN; ROBBA; SCHMIDT, 2009).

A falta de fornecimento de energia elétrica gera prejuízos aos consumidores e as empresas de distribuição. As empresas perdem de forma direta, pela energia não entregue durante aquele período de tempo, além de serem penalizadas, caso não se adequem aos valores do DEC, FEC, DIC e DMIC estabelecidos pela norma (ANEEL 024/2000) como mencionado. Já no caso dos consumidores, os prejuízos são relativos, pois a interrupção de um consumidor residencial é diferente de um consumidor comercial (exemplo Shopping).

Estes prejuízos podem chegar a milhares de reais, no caso dos consumidores industriais (exemplo parada da produção).

Frente à ocorrência de uma falta, as empresas de distribuição têm seus procedimentos próprios, sendo que em sua maioria, a interrupção é registrada através de telefonemas feitos pelos consumidores. Em seguida, é acionada a equipe de manutenção para proceder à localização da falta e posterior restabelecimento da energia elétrica. A localização significa identificar o ponto geográfico onde ocorreu a falta elétrica. O tempo utilizado afeta de forma direta os índices de interrupção mencionados anteriormente. Por este motivo, é de extrema importância reduzir este tempo através de procedimentos inteligentes, visando manter os valores dos índices de interrupção abaixo dos estabelecidos pela regulamentação.

Minimizar o tempo de localização enquadra-se como um problema de otimização. Na literatura apresentam-se vários trabalhos que solucionam o problema de localização de faltas. O primeiro grupo de trabalhos utiliza métodos baseados nas componentes fundamentais de tensão e corrente, o segundo grupo utiliza métodos que empregam informações contidas nos transitórios de faltas, e o terceiro utiliza sistemas inteligentes, como Redes Neurais e Lógica Fuzzy. A escolha de uma técnica para localizar a falta depende da disponibilidade de informação quanto aos medidores e quanto ao investimento planejado pela empresa. Desta forma, deverão ser avaliadas as relações custo-benefício para a escolha do método mais adequado para localizar uma falta elétrica (COSER, 2006).

Uma das dificuldades encontradas para a utilização destes métodos é a complexidade das redes elétricas (redes reais) que frequentemente estão sendo modificadas. Novas cargas são adicionadas, equipamentos novos são instalados, novos geradores são inseridos na rede, entre outros. Isso torna mais difícil a localização das faltas.

Sendo assim, a escolha de uma técnica para localizar a falta depende da disponibilidade de instrumentos para medição e do investimento planejado pela empresa. Assim avaliando as relações custo-benefício, é possível escolher o método mais adequado para atender a solicitação (COSER, 2006).

1.1 Objetivo e Motivação

Este trabalho tem por objetivo principal, desenvolver as técnicas de otimização: Otimização por Nuvens de Partículas - ONP (do inglês: particle swarm optimization) e Busca em Vizinhança Variável – VNS (do inglês: variable neighborhood search), visando localizar o ponto geográfico de falta frente a ocorrência de uma falta elétrica, a qual gera uma interrupção de fornecimento de energia elétrica em um grupo de consumidores.

Como objetivos secundários têm-se aprofundar sobre: a teoria e métodos da localização de faltas; equipamentos de medição; e técnicas de otimização (ONP e VNS).

A escolha do problema apresentado neste trabalho foi pelo grande interesse das empresas distribuidoras. Caso as empresas não se adéquem aos índices de interrupção, são multadas. A escolha dos métodos de otimização ONP e VNS foi motivada pela efetividade destes métodos em diferentes áreas do conhecimento, assim como pela simplicidade na implementação (PAPIA; MISHRA; PANDA, 2015) (REIS, 2013).

1.2 Organização do Trabalho

No capítulo 1, foi apresentado o problema apontado pelas empresas distribuidoras de energia elétrica quando se dá a ocorrência de faltas em linhas de transmissão e/ou distribuição, desencadeando uma interrupção de energia elétrica.

No capítulo 2, são descritos os elementos de um sistema de distribuição, seus modelos matemáticos e suas características.

No capítulo 3, é desenvolvida uma análise de fluxo de potência em redes de distribuição que operam de forma radial. Para o qual é utilizado o método Backward-Forward Sweep, próprio para este tipo de rede (operação radial). Também é abordada a teoria de análise de curto-circuito.

No capítulo 4, são apresentadas as metodologias ONP e VNS, suas características e algoritmos. Ao final é validada a técnica aplicada às funções de difícil solução.

No capítulo 5, são desenvolvidas as metodologias ONP e VNS aplicadas ao problema de localização de faltas. De uma forma detalhada são mostradas e ilustradas o passo a passo das técnicas. Foi apresentado um exemplo de aplicação.

No capítulo 6, são ilustrados os resultados da aplicação das técnicas ONP e VNS em diferentes redes elétricas e considerado diferentes cenários de alocação de medidores e canais de medição.

1.3 Revisão Bibliográfica

Com o objetivo de identificar o ponto exato de ocorrência da falta, foram encontradas na bibliografia diversas metodologias. Em seu método mais primitivo, para se localizar uma falta, toda linha era percorrida, procurando de forma visual o ponto de ocorrência. Essa busca poderia ser realizada a pé, de carro ou helicóptero (STRINGFIELD; MARIHART; STEVENS, 1957).

O método de busca visual apresenta muitos pontos negativos, como: alto tempo para solução (afetando assim o tempo de interrupção do serviço), alto custo devido ao deslocamento de uma equipe para fazer a verificação, além dos prejuízos causados pela falta de fornecimento aos consumidores afetados. Outro ponto agravante é que muitas das vezes esses defeitos acontecem em situações adversas como em tempestades e à noite, o que dificulta esse tipo de busca e a torna quase impraticável.

Em STRINGFIELD, MARIHART e STEVENS (1957) foram descritas metodologias conhecidas e aplicadas à localização de faltas até a data de sua publicação. Embora tenham sido originalmente desenvolvidas para a localização em sistemas de transmissão, impulsionaram os estudos na área, até que (TAKAGI et al., 1982a), propôs um método aplicado aos sistemas de distribuição. A partir de então, com o avanço das tecnologias digitais, novas metodologias mais eficientes (automatizadas) têm sido amplamente estudadas.

Segundo (COSER, 2006), a localização digital de faltas, pode ser classificada de acordo com a filosofia implementada no algoritmo de localização (dados de entrada e metodologia aplicada). Em sistemas de distribuição, por apresentarem características típicas como: radialidade, derivações de uma, duas ou três fases e carregamento desequilibrado, foi desenvolvido uma ferramenta de localização que considera tais características (COSER, 2006). O trabalho aborda as principais metodologias aplicadas à localização de faltas em sistemas de distribuição, sendo estas:

1. Métodos baseados nas componentes de frequência fundamental de tensão e corrente;
2. Métodos baseados nas componentes de alta frequência (transitório);e,
3. Sistemas especialistas;

A primeira metodologia pode ainda ser classificada de acordo com a forma de obtenção dos dados, podendo ser: Utilização de dados provenientes de apenas um terminal; e Utilização de dados provenientes de dois ou mais terminais.

Pereira (2007) propõe uma técnica de localização de faltas para sistemas radiais aéreos, tendo como dados de entrada, registros dos fasores de tensão e corrente de frequência fundamental de pré-falta e durante a falta. Estes dados foram obtidos através dos medidores instalados ao longo do alimentador. A técnica de otimização aplicada são os Algoritmos Genéticos. É utilizado um cálculo de curto-circuito para estimar valores dos diferentes parâmetros da rede elétrica. Naqueles locais onde se tem medidores são comparados os valores de tensão estimados (curto-circuito) com valores medidos (medidores). O trabalho ainda desenvolve alocação otimizada de medidores de tensão para localização de falta, de forma a obter equilíbrio entre custo e benefício aos consumidores em termos da qualidade do serviço.

Em Filomena (2008), foi desenvolvido um algoritmo de localização de faltas para alimentadores subterrâneos em média tensão, baseado no cálculo da impedância aparente. Foram utilizadas informações de tensão e corrente de frequência fundamental, obtida dos medidores instalados na subestação, ou seja, dados obtidos de apenas um terminal. A justificativa para tal abordagem é que os métodos tradicionais para localização de faltas em redes de distribuição aéreas não contemplam características típicas das redes subterrâneas, que acabam estimando de forma errônea a distância de falta. O algoritmo pode ser implementado em um hardware específico ou como sub-rotina de relés digitais.

Sadeh, Bakhshizadeh e Kazemzadeh (2012) propõem um método de estimação da distância de falta e seção do defeito baseado nos princípios de ondas viajantes. Ondas viajantes se propagam entre o ponto de falta e a subestação a uma frequência elevada e com valor proporcional à distância entre o ponto de falta e a subestação. Em sistemas de distribuição que apresentam um ramo principal e vários laterais, ondas refletidas pelos nós também chegam à subestação, sendo estas denominadas no trabalho de componentes subordinados e que precisam ser diferenciadas. Para aplicação do método proposto, devido à ligação delta do lado secundário dos transformadores de distribuição, a amplitude para casos de falta fase a terra é baixa. Assim, foi necessário dividir o método em dois grupos: faltas fase a terra e demais faltas. Usando a transformação de Clark, as tensões são transformadas do domínio de fase para nodal. Identificando a componente principal e subordinada, são comparados os resultados com um banco de dados anteriormente determinado. Desta forma é determinada a seção e distância de falta.

Em Modolon (2013) é apresentado um sistema de detecção e localização de faltas utilizando sinalizadores de falta. Estes dispositivos sinalizam com indicação luminosa ao perceberem uma falta no trecho a jusante de onde estão instalados. Assim, quanto mais

se deseja restringir o espaço de busca do ponto sob falta, mais dispositivos precisavam ser alocados na rede, o que eleva o custo de instalação do sistema. No trabalho, é utilizado um sinalizador Linetraool, que identifica uma falta a terra e curto-circuito. A contribuição do trabalho é coletar os dados dos sinalizadores, e através de um equipamento composto por um microprocessador, módulo zigbee, e um GSM, que transmitem informações de: hora, data, fase, tipo e localização do circuito aos centros de operação das concessionárias utilizando uma rede sem fio. Assim, elimina-se a necessidade da busca visual pela atuação dos sinalizadores de falta.

Navaro (2014) apresenta uma metodologia de localização fundamentada em RNAs dividida em três módulos distintos: módulo de detecção de falta, que necessita de dados de tensão e corrente de operação pré e pós-falta; módulo de Classificação e módulo de localização do trecho que necessitam apenas dos dados de operação pós falta. A partir de simulações dos diferentes tipos de faltas, ângulo de incidência e localização, foi realizado o treinamento das RNAs para reconhecimento dos padrões das diversas faltas e assim obter uma precisa localização do ponto de defeito.

Em Papia, Mishra e Panda (2015) é apresentado uma técnica híbrida de localização. É utilizado uma combinação das técnicas Otimização por Nuvem de Partícula e Inteligência Artificial. Em síntese, os sinais de corrente obtidos da linha sob estudo são decompostos pela transformada de Wavelet. Com esses dados a ONP seleciona dentre Support Vector Machine (SVM) e Rede Neural a técnica de inteligência artificial que apresenta as melhores características para localização desta falta. Assim, a técnica de inteligência selecionada, previamente treinada através de simulações dos diferentes tipos de faltas, ângulos, resistência de falta, irá estimar a distância de falta.

Divya e Srinivasan (2016) propõe um método de localização para sistemas de geração distribuída. Como método de otimização para busca do ponto exato de defeito, é utilizado ONP. O processo de localização é dividido em duas etapas: a primeira consiste na determinação de todos os prováveis pontos de defeito baseado nas equações originais de localização fundamentadas na impedância; na segunda etapa, utiliza-se combinação das informações dos medidores de tensão na subestação e cada gerador distribuído, comparando valores reais e estimados de falta. Assim, determina-se a provável localização do defeito, entre os múltiplos encontrados na primeira etapa.

2 Sistemas de Distribuição

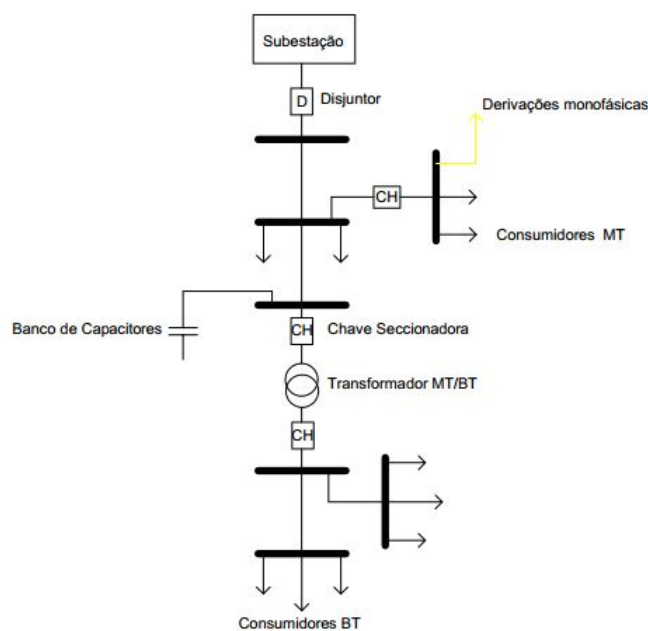
As redes de distribuição têm a função de interligar o sistema de transmissão aos consumidores finais. Estes podem ser supridos pela rede de distribuição primária, classificada como de média tensão, ou pela rede de distribuição secundária, de baixa tensão.

As linhas de distribuição primárias operam com tensões entre 2,3kV e 44kV, sendo 13,8kV a mais comumente utilizada para distribuição no país. Já as linhas secundárias operam com tensões entre 110V e 440V (ABRADEE, 2015). Estas redes apresentam em sua maioria a topologia radial e são redes consideradas curtas (KAGAN, 2010).

2.1 Redes de distribuição

O sistema de distribuição se inicia na subestação, que tem como principal função redução do nível de tensão de transmissão para distribuição. A subestação é também um ponto de monitoramento do sistema. No caso de uma falta, os fasores monitorados de tensão e corrente podem ser utilizados para determinação do local de defeito. A Figura 1, mostra um modelo simples de uma linha de distribuição.

Figura 1 – Modelo de uma Rede de Distribuição



Fonte: Adaptado de (COSER, 2006)

2.2 Dispositivos de Proteção do Sistema de Distribuição

Ao longo do alimentador, são dispostos diversos dispositivos de proteção. Na ocorrência de uma falta, a atuação de algum desses dispositivos deve satisfazer os critérios de seletividade, isolando apenas as partes defeituosas e mantendo em operação as demais partes do sistema. Para atender este requisito, o dimensionamento destes dispositivos devem ser levadas em consideração as cargas instaladas em todas as suas ramificações (MORETO, 2012).

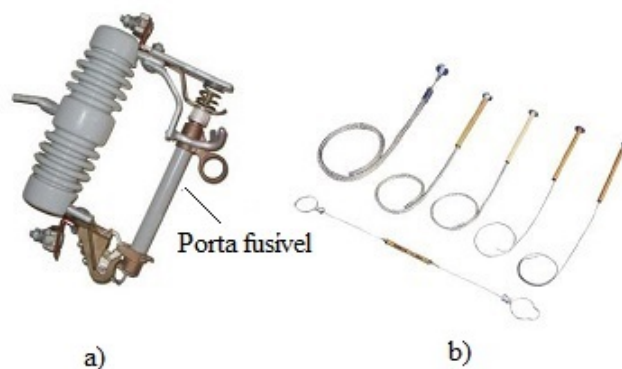
Atender ao critério de seletividade pode ser essencial aos métodos de localização de faltas. Devido a simetria das redes de distribuição, um medidor pode registrar mesmos valores de tensão para defeitos em pontos diferentes. Assim, com as informações dos dispositivos de proteção atuados, se estes ocorrem de maneira adequada, podem contornar um possível erro de localização.

Os dispositivos mais utilizados nos sistemas primários de distribuição e suas utilizações são descritas a seguir:

- Elos Fusíveis;

São utilizados para proteção de alimentadores, cargas e transformadores. Quando o dispositivo atua, necessita-se substituir o mesmo para restabelecer o fornecimento de energia (MORETO, 2012).

Figura 2 – Elementos de Proteção a) Chave Fusível b) Elo Fusível



Fonte: (CRISMEG, 2016)

- Religadores Automáticos;

Grande utilização na distribuição. A capacidade de atuar em faltas temporárias e permanentes e restabelecer o fornecimento sem necessidade de troca do dispositivo é um grande diferencial para substituição dos fusíveis. Ao sentir o distúrbio, os religadores automáticos abrem o circuito a jusante, e após um tempo determinado, fazem o fechamento do circuito novamente. Assim, se a falta for temporária, o circuito voltará ao funcionamento normal e no caso de falta permanente o dispositivo repetirá o ciclo por até três vezes, mantendo o circuito com defeito aberto até o seu devido reparo (PIOLI, 2004).

Figura 3 – Religador Automático



Fonte: (ABB, 2016)

- Seccionadora ou Seccionadores Automáticos;

Funcionam em conjunto com os religadores automáticos. Ligado no lado de carga do religador, conta o número de faltas e assim isola o circuito após um número determinado destas ocorrências.

Figura 4 – Seccionador



Fonte: (ABB, 2016)

- Relés de Sobre-corrente;

São dispositivos que atuam quando a corrente excede a um valor de ajuste pré-fixado, por um certo período de tempo, abrindo então contatos e interrompendo o fornecimento (PIOLI, 2004).

Figura 5 – Disjuntor com relé de proteção de sobrecorrente



Fonte: (SCHNEIDER, 2016)

- Relés Digitais;

Dispositivo amplamente utilizado para proteção dos sistemas elétricos. O relé pode ser programado de forma a efetuar medições, monitoramento e comunicação de um conjunto de dados. Como característica de interesse maior para este trabalho é permitido implementar no próprio dispositivo um algoritmo de localização de faltas, que é o objetivo do trabalho proposto (PIOLI, 2004).

Figura 6 – Relé de Proteção Digital



Fonte: (SCHNEIDER, 2016)

2.3 Modelagem de uma Rede de Distribuição para Análise de Fluxo de Carga e de Curto-Circuito

Na modelagem de linhas curtas e médias, parâmetros de resistência e indutância representados com valores concentrados, são suficientes para obter resultados precisos (KAGAN, 2010). As equações que descrevem os valores de tensão e corrente na linha podem ser aproximadas de acordo com essas considerações.

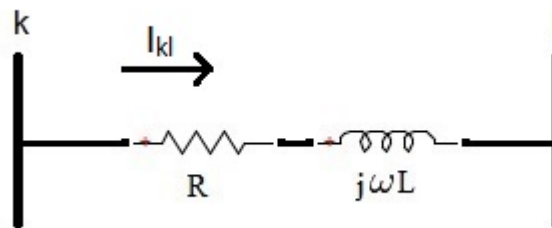
Linhas médias podem ser representadas com precisão pelo modelo equivalente π . Neste modelo os valores de R e L são também concentradas, mas se faz necessário acrescentar os valores de capacitância com metade do seu valor em cada extremidade do trecho (barras).

Neste trabalho, o modelo equivalente utilizado foi o de linha curta, que apresenta precisão suficiente para as redes de distribuição estudadas.

2.3.1 Modelo Linha Curta

Para as linhas curtas, o efeito da capacitância pode ser desprezado (KAGAN, 2010). E assim, a linha pode ser modelada apenas como uma resistência e uma indutância em série.

Figura 7 – Modelo linha curta



De acordo com a Figura 7, as equações para linha podem ser escritas da seguinte forma:

$$V_l = V_k - I_{kl}Z_{kl} \quad (2.1)$$

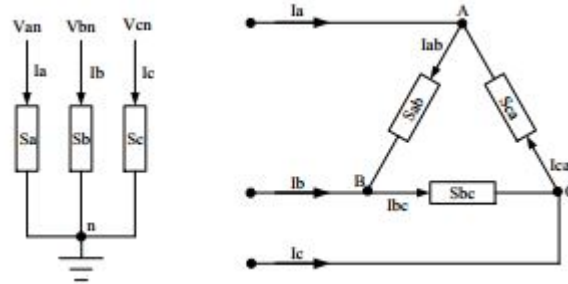
onde:

I_{kl} , Z_{kl} são respectivamente a corrente e a impedância do trecho entre barras k e l.

2.4 Modelos de carga

Cargas conectadas ao sistema de distribuição podem ser monofásicas, bifásicas ou trifásicas. Geralmente, são especificadas pela potência complexa demandada. Nos casos de cargas trifásicas, estas podem ter seus terminais ligados em estrela ou triângulo. A figura 8 ilustra estes modelos.

Figura 8 – Representação das cargas



Fonte: (PEREIRA, 2007)

As equações para estes modelos podem ser descritas como segue:

$$S_{esp} = V_{esp} \cdot I_{esp}^* \quad (2.2)$$

$$V_{esp} = Z_{esp} \cdot I_{esp} \quad (2.3)$$

Onde:

- S_{esp} é a potência especificada; e,
- $*$ é o conjugado da corrente especificada.

2.4.1 Cargas de Potência Constante

No modelo de potência constante, a variação na tensão das barras não afeta as potências, as quais continuam iguais aos seus valores de referência. Assim, a corrente absorvida pela carga será inversamente proporcional a tensão. As equações que descrevem este modelo considerado são apresentadas a seguir:

$$S_{esp} = V \cdot I^* \quad (2.4)$$

$$V_{esp} \cdot I_{esp}^* = V \cdot I^* \quad (2.5)$$

$$I = \left(\frac{S_{esp}}{V} \right)^* \quad (2.6)$$

2.4.2 Cargas de Corrente Constante

Neste modelo, a magnitude da corrente da carga e ângulo entre tensão e corrente não sofrem variações. Com estas considerações, a corrente pode ser definida como:

$$I_{esp} = \frac{S^*}{V^*} \quad (2.7)$$

Como o ângulo de rotação entre tensão e corrente não sofre alteração, a fase da potência para qualquer valor de tensão será ϕ . Assim, $S = S\angle\phi$. Sendo $V = V\angle\theta$ a tensão aplicada a carga, a corrente absorvida pela carga pode ser dada por:

$$I_{esp} = \frac{S\angle-\phi}{V\angle-\theta} = \frac{S}{V}\angle(\theta - \phi) \quad (2.8)$$

Então, para qualquer valor de tensão aplicada $V = V\angle\theta$ a corrente será:

$$I = I\angle(\theta - \phi) = I_{esp} \quad (2.9)$$

A potência consumida pela carga irá variar linearmente com a tensão, podendo ser descrita como segue:

$$\frac{S}{V} = \frac{S_{esp}}{V_{esp}} \quad (2.10)$$

$$S = \frac{S_{esp} \cdot V}{V_{esp}} \quad (2.11)$$

2.4.3 Cargas de Impedância Constante

Neste caso, a impedância se mantém invariante. Chuveiros e equipamentos resistivos são exemplos deste tipo de carga.

A impedância pode ser definida em função da potência absorvida quando alimentada com tensão nominal, ou seja:

$$Z_{esp} = \left(\frac{|V_{esp}|^2}{S_{esp}^*} \right) \quad (2.12)$$

Sendo a corrente dada por:

$$I = \frac{V}{Z_{esp}} \quad (2.13)$$

Substituindo 2.12 em 2.13 , a corrente da carga pode ser escrita da seguinte maneira:

$$I = \frac{V \cdot S_{esp}^*}{|V_{esp}|^2} \quad (2.14)$$

2.4.4 Modelo Combinado de Carga

O modelo combinado de carga, representa uma combinação linear das equações 2.6, ?? e 2.14. O modelo de carga mista pode ser dado por (PEREIRA, 2007):

$$I = \frac{\alpha}{100} \cdot \left(\frac{S_{esp}^*}{V} \right) + \frac{\beta}{100} \cdot \left(\frac{V \cdot S_{esp}^*}{|V_{esp}|^2} \right) + \frac{\delta}{100} \cdot \left(\frac{S_{esp}^*}{|V_{esp}|} \cdot \frac{V}{|V|} \right) \quad (2.15)$$

sendo:

- α : porcentagem de carga de potência constante;
- β : porcentagem de carga de impedância constante;
- δ : porcentagem de carga de corrente constante, e;
- $\alpha + \beta + \delta = 100$

3 Fluxo de Potência e Análise de Curto-Circuito para Redes de Distribuição

3.1 Fluxo de Potência

A resolução do fluxo de potência tem como objetivo conhecer o ponto de operação da rede e, a partir de então, avaliar se esta condição está dentro dos requisitos estipulados de operação como:

- Os valores das tensões nas barras devem estar dentro dos valores estabelecidos pela norma (ANEEL 024/2000).
- As condições máximas de carregamento de cada trecho da linha devem estar dentro de suas capacidades.
- As perdas de potência para a condição de operação são as desejadas, ou deve-se avaliar novos pontos de operação.

Para sistemas de distribuição que apresentam topologias radiais ou fracamente malhadas, os métodos de varredura são eficientes, de fácil implementação e, por isso, são mais empregados.

3.1.1 Método de Varredura Backward-Forward Sweep Trifásio

Existem alguns métodos para solução de sistemas radiais como: Backward-Forward Sweep e Baran-Wu. O método de varredura implementado foi o Backward-Forward Sweep (BFS). O método consiste, em síntese, na aplicação das leis de Kirchhoff para cálculo das tensões e correntes e, através de um processo iterativo de atualização destes parâmetros determina a condição de operação da rede.

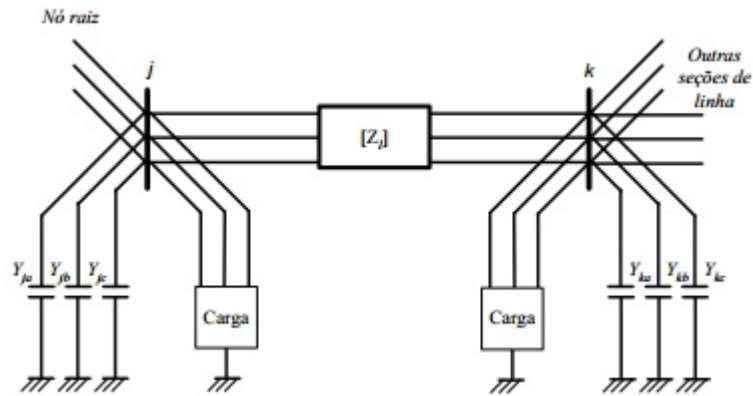
O algoritmo BSW consiste em dois passos:

- Backward: Nesta etapa são calculadas as correntes ou fluxo de potência com possíveis atualizações da tensão.
- Forward: São calculadas as quedas de tensão com possíveis atualizações das correntes ou fluxo de potência. Os passos para implementação do algoritmo são descritos a seguir.

3.1.2 Fluxo de Potência Trifásico pelo Método Backward-Forward Sweep

Um trecho de uma linha de distribuição está representada na figura 9. Os elementos capacitivos são bancos de capacitores que têm como principais finalidades a correção do fator de potência e diminuição das perdas.

Figura 9 – Representação Seção Pai-Filho.



Fonte: (PEREIRA, 2007)

A impedância de uma linha trifásica entre duas barras j e k , pode escrita conforme a equação 3.1. Os elementos da diagonal principal representam a impedância própria da linha e as impedância fora da diagonal são as impedâncias mútuas entre as linhas, que ocorrem devido ao campo magnético criado pela circulação de corrente em uma fase que intercepta os demais condutores. A matriz de impedância pode ser escrita como:

$$Z = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

1. Cálculo das correntes na barra

O primeira passo consiste em calcular as correntes na barra devido à injeção de corrente das cargas, modeladas como sendo de potência constante, e a corrente dos elementos shunt, que são bancos de capacitores conectados a barra. Para o cálculo das correntes, inicialmente, é usual estipular o valores de tensão de todas as barras como sendo a tensão da subestação. A equação 3.2 descreve a corrente na barra.

$$\begin{bmatrix} I_{ja} \\ I_{jb} \\ I_{jc} \end{bmatrix}^i = \begin{bmatrix} (S_{ja}/V_{ja}^{i-1})^* \\ (S_{jb}/V_{jb}^{i-1})^* \\ (S_{jc}/V_{jc}^{i-1})^* \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Y_{ja} & 0 & 0 \\ 0 & Y_{jb} & 0 \\ 0 & 0 & Y_{jc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{ja} \\ V_{jb} \\ V_{jc} \end{bmatrix}^{(i-1)} \quad (3.2)$$

Na equação 3.2 as variáveis representam:

I_{ja}, I_{jb}, I_{jc} , injeções de corrente da carga e elemento shunt(banco de capacitores).

S_{ja}, S_{jb}, S_{jc} , potência da carga conectada a barra k.

V_{ja}, V_{jb}, V_{jc} , tensão da barra k.

Y_{ja}, Y_{jb}, Y_{jc} , admitância do elemento shunt conectado a barra k.

2. Etapa Backward : Cálculo das correntes nos trechos

Consiste em calcular as corrente em todos os trechos da rede, no sentido da carga para a subestação. As equações 3.2 e 3.3 representam esse processo.

A equação 3.3, é o somatório das correntes em uma barra m com as correntes das barras a jusante interligadas a esta. Esse somatório é a corrente que flui no trecho a montante dessa barra m até a barra imediatamente anterior, chamada "pai".

$$\begin{bmatrix} J_{la} \\ J_{lb} \\ J_{lc} \end{bmatrix}^i = \begin{bmatrix} I_{ka} \\ I_{kb} \\ I_{kc} \end{bmatrix}^i + \sum_{m \in M} \begin{bmatrix} J_{ma} \\ J_{mb} \\ J_{mc} \end{bmatrix}^i \quad (3.3)$$

Na equação 3.3:

J_{ja}, J_{jb}, J_{jc} , correntes que fluem na linha l .

M , representa todos trechos conectados a jusante da barra k .

3. Etapa Forward: Atualização das tensões

Consiste em atualizar os novos valores de tensão nas barras (lei de Kirchoff), utilizando os valores de corrente obtidos na etapa 2.

$$\begin{bmatrix} V_{ka} \\ V_{kb} \\ V_{kc} \end{bmatrix}^i = \begin{bmatrix} V_{ja} \\ V_{jb} \\ V_{jc} \end{bmatrix}^i - \begin{bmatrix} Z_{aa,l} & Z_{ab,l} & Z_{ac,l} \\ Z_{ba,l} & Z_{bb,l} & Z_{bc,l} \\ Z_{ca,l} & Z_{cb,l} & Z_{cc,l} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} J_{la} \\ J_{lb} \\ J_{lc} \end{bmatrix}^i \quad (3.4)$$

4. Critério de convergência

O critério de convergência utilizando foi o de variação das perdas ΔP . Este é atendido quando a maior entre as variações das perdas por fase for menor que o erro pré-definido. Este valor pré-definido do erro deve ser baixo, caso contrário, o algoritmo implementado pode convergir para uma condição de operação diferente da real. A variação das perdas é definida na equação 3.5.

$$\Delta P = \sum_{n=1}^l \begin{bmatrix} r_{al} \cdot |I_{al}|^2 \\ r_{bl} \cdot |I_{bl}|^2 \\ r_{cl} \cdot |I_{cl}|^2 \end{bmatrix}^i - \begin{bmatrix} P_a \\ P_b \\ P_c \end{bmatrix}^{i-1} \quad (3.5)$$

sendo:

r_{al}, r_{bl}, I_{al} , resistência por fase da linha l .

I_{al}, I_{bl}, I_{cl} , Corrente no trecho l .

P_a, P_b, P_c , Perdas totais por fase.

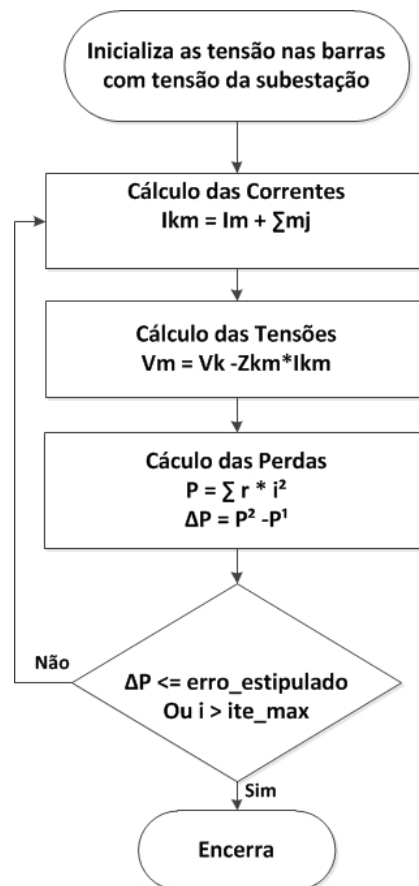
3.1.3 Algoritmo Backward-Forward Sweep

O algoritmo foi implementada seguindo os seguintes passos:

1. Inicialização dos valores de tensão nas barras com o valor de tensão da subestação.
2. Backward - Cálculo das correntes dos ramos.
3. Forward - Atualização dos valores de tensão.
4. Cálculos das perdas.
5. Critério de Convergência atendido ou limite iteração atingido?
Sim - Encerra Não - Volta passo 2

A figura 10 ilustra o algoritmo BFS implementado.

Figura 10 – Diagrama Método BFS Fluxo de Potência.



3.2 Análise de Curto-Circuito

A análise de curto-circuito fornece informações importantes do sistema na ocorrência de defeitos. Estas informações servem como parâmetro para dimensionamento da linha quanto à sua capacidade térmica, dimensionamento de disjuntores, coordenação de réles, além do conhecimento de sua magnitude e sua possível utilização para localização de faltas (KINDERMANN, 1997).

Devido à estrutura do sistema elétrico, os defeitos podem ocorrer em pontos aleatórios do sistema e ter causas variadas como: queda de árvores, ventos fortes, falta de isolamento, entre outros. No sistema elétrico, os defeitos que ocorrem com mais frequência são do tipo fase à terra. Os trifásicos devido ao próprio conjunto de fatores coincidentes para ocorrência do tipo de curto, tem menor ocorrência. A tabela 1 ilustra as porcentagens médias de ocorrência de cada tipo de defeito. O método proposto no capítulo 4 busca identificação do tipo de defeito e sua localização na rede.

Tabela 1 – Ocorrências de Curto-Circuito

Tipos de Curto-Circuito	Percentual de ocorrência (%)
1ϕ -terra	63
2ϕ -terra	16
2ϕ	15
3ϕ	6

Fonte: (KINDERMANN, 1997)

3.2.1 Corrente de defeito transitório e permanente

Na ocorrência de um defeito, há o aparecimento de duas componentes da corrente, uma de efeito transitório e outra de efeito permanente. A corrente de efeito transitório, como sugere o nome, ocorre durante um curto período de tempo, onde o valor desta componente decresce com o tempo. A componente permanente é a corrente que circula pela rede após se anular a corrente de efeito transitório. Esta componente possui a mesma frequência de operação da rede e é mais fácil de ser determinada. Conhecidos os parâmetros da linha e utilizando os conceitos de Thèvenin, é possível calcular os valores da componente permanente.

A corrente de curto-circuito em regime permanente é determinada como sendo a soma das correntes no circuito de pré-falta (corrente antes do surgimento defeito) com a corrente puro de falta (corrente de defeito), ou seja:

$$\dot{I}_{k-j} = \dot{I}'_{k-j} + \dot{I}''_{k-j} \text{ onde,}$$

\dot{I}_{k-j} é a corrente no trecho durante curto-circuito

\dot{I}'_{k-j} é a corrente no trecho antes do curto-circuito (pré-falta)

\dot{I}''_{k-j} é a corrente no trecho somente devido a corrente de defeito (puro de falta).

O método proposto no capítulo 4 utiliza os fasores de tensão em regime permanente para localização de faltas.

3.2.2 Componentes Simétricas

A ocorrência de curto-circuito em um sistema elétrico gera desbalanceamentos, que tornam cálculos e simulações mais difíceis. Isso trouxe a necessidade de uma ferramenta analítica, que tornasse mais simples os estudos de um sistema sob essas condições. Então, em 1915, Fortescue conseguiu descrever de forma analítica a decomposição de um sistema qualquer de "n" fases desequilibradas em componentes simétricas equilibradas, que posteriormente foi adaptada e utilizada nos sistemas elétricos de potência (KINDERMANN, 1997).

De acordo com o teorema de Fortescue (componentes simétricas), um conjunto de k fasores desbalanceados pode ser descrito como um conjunto de k fasores de sequência zero, mais k-1 conjunto de fasores balanceados. Assim, para um sistema trifásico, n=3, os fasores de tensão e corrente podem ser representados da seguinte maneira:

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Assim a transformação de Fortescue, para sistemas trifásicos pode ser escrita como:

$$\bar{I}_f = \tilde{Q}\bar{I}_s \quad (3.8)$$

$$\bar{V}_f = \tilde{Q}\bar{V}_s \quad (3.9)$$

onde:

$$\tilde{Q} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix}$$

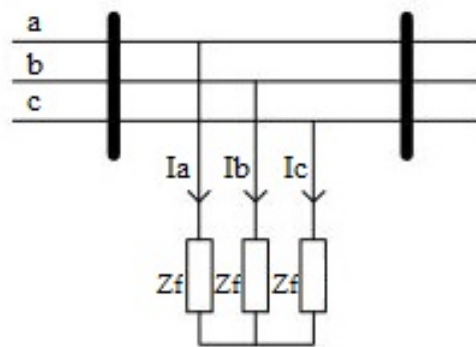
sendo:

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

3.2.3 Modelagem de um Curto-Circuito Trifásico

Um curto-circuito trifásico dado através de uma impedância de falta "Zf" é ilustrado na figura 11.

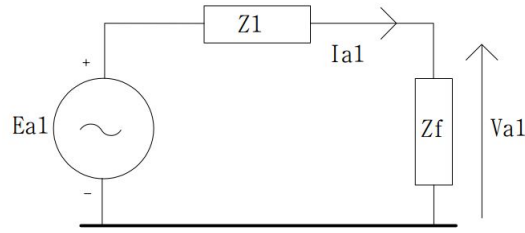
Figura 11 – curto-circuito trifásico



Fonte: Adaptado de (STEVENSON, 1986)

Para uma rede trifásica, suprida por n geradores simétricos, com cargas simétricas, na ocorrência de um curto-circuito trifásico, as correntes Ia, Ib e Ic serão iguais em módulo e defasadas entre si de 120°(em regime permanente). Assim, o circuito equivalente de sequência positiva (Figura12) é suficiente para determinação das correntes de defeito nas três fases da rede, pois as correntes de sequência negativa e zero serão nulas (KAGAN, 2010).

Figura 12 – Modelo de curto-circuito trifásico.



Fonte: Adaptado de (KAGAN, 2010)

Sendo assim, a corrente de defeito pode ser definida como:

$$I_{def} = \frac{E_{a1}}{Z_1 + Z_f} = I_{a1} = I_a \quad (3.10)$$

sendo:

Z_f a impedância de sequência positiva vista a partir do ponto de curto.

Calculando a corrente de defeito, determina-se o efeito desta nos demais trechos do circuito. Calcula-se as tensões nas barras somente devido à corrente de defeito e então as correntes e tensões finais podem ser definidas pela soma dos valores de pré e pós falta, ou seja:

$$\dot{I}_{k-j} = \dot{I}'_{k-j} + \dot{I}''_{k-j} \quad (3.11)$$

$$\dot{V}_k = \dot{V}'_k + \dot{V}''_k \quad (3.12)$$

onde:

\dot{V}_k e \dot{I}_{k-j} são valores de tensão e corrente durante o curto-circuito;

\dot{V}'_k e \dot{I}'_{k-j} são valores de tensão e corrente pré-falta;

\dot{V}''_k e \dot{I}''_{k-j} são valores de tensão e corrente puros de falta.

3.2.4 Modelagem de um Curto-Circuito Fase-Terra

Será estudada apenas a condição de falta da fase "a" para terra. Neste caso, os valores de corrente de curto para as fases b e c são nulos, e o valor de tensão no ponto de curto pode ser definido aplicando a lei Kirchoff (STEVENSON, 1986). Estas considerações são mostradas a seguir:

$$I_b = I_c = 0$$

$$V_a = Z_f I_a$$

Aplicando o teorema de Fortescue determina-se as correntes de sequência positiva, negativa e zero.

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

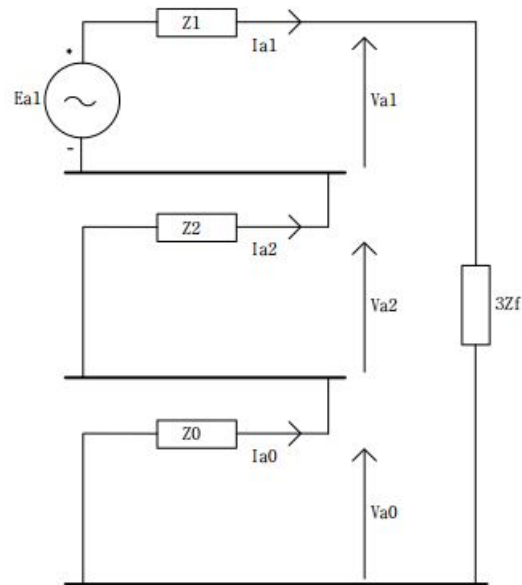
Assim temos:

$$I_{a0} = I_{a1} = I_{a2} = \frac{1}{3} I_a \quad (3.14)$$

$$V_{a0} + V_{a1} + V_{a2} = Z_f I_a \quad (3.15)$$

A partir das equações 3.14 e 3.14 é possível chegar ao circuito equivalente mostrado na Figura 13.

Figura 13 – Modelo Curto fase-terra.



Fonte: Adaptado de (STEVENSON, 1986)

Com circuito equivalente (Figura 13), é possível descrever as equações do curto-circuito para este caso. Assim, temos:

$$I_{a1} = \frac{E_{a1}}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3Z_f} \quad (3.16)$$

$$V_{a1} = E_{a1} - Z_1 I_{a1} \quad (3.17)$$

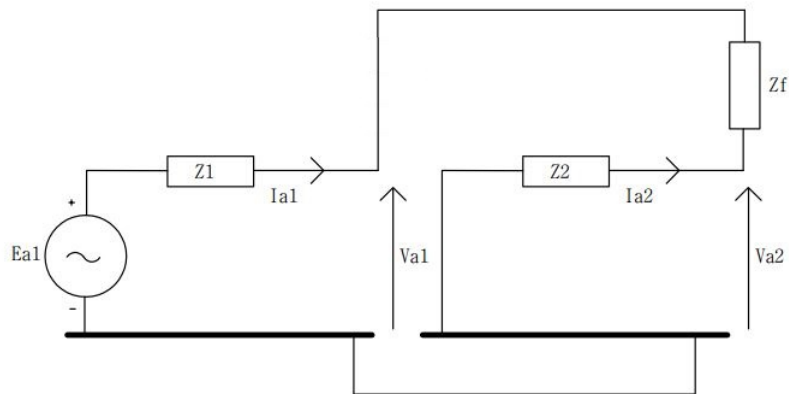
$$V_{a2} = -Z_2 I_{a2} \quad (3.18)$$

$$V_{a0} = -Z_0 I_{a0} \quad (3.19)$$

3.2.5 Modelagem de um Curto-Circuito Dupla-Fase BC

Neste caso, é considerado apenas o contato entre as fases "b" e "c", sem contato com a terra. Sendo assim, a corrente de curto na fase "a" será nula e o circuito equivalente deste tipo de falta se torna o apresentado na Figura 14.

Figura 14 – Modelo Curto dupla-fase.



Fonte: Adaptado de (STEVENSON, 1986)

A partir do circuito equivalente, é possível chegar às seguintes considerações:

$$I_{a2} = -I_{a1}$$

$$I_{a0} = 0$$

Sendo a componente de sequência positiva equivalente a:

$$I_{a1} = \frac{E_{a1}}{Z_1 + Z_2 + Z_f} \quad (3.20)$$

$$V_{a0} = -Z_0 I_{a0} \quad (3.21)$$

$$V_{a1} = E_{a1} - Z_1 I_{a1} \quad (3.22)$$

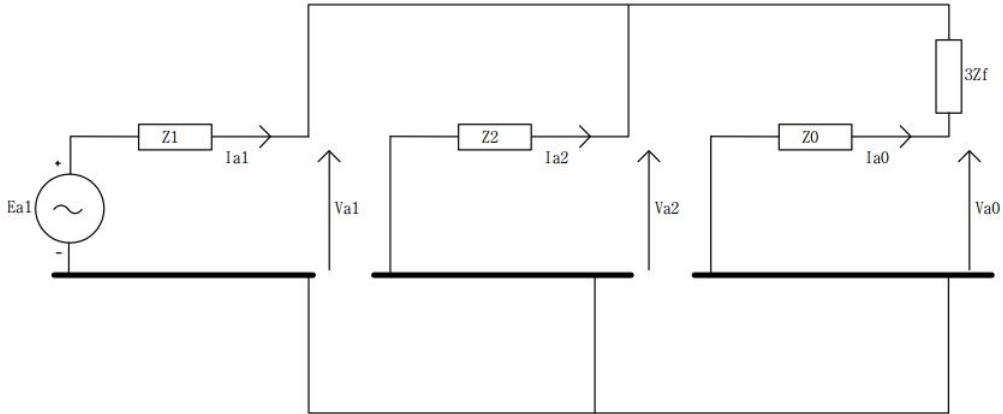
$$V_{a2} = -Z_2 I_{a2} \quad (3.23)$$

Aplicando as matrizes de transformação descritas nas equações 3.8 e 3.9 determina-se as tensões e correntes nas fases da rede.

3.2.6 Modelagem de um Curto-Circuito Dupla-Fase BCT

Neste caso, além do contato entre as fases, há também contato das fases com a terra. Assim, a impedância que aparece na Figura 15 é referente a esta impedância. O modelo equivalente deste caso é mostrado a seguir:

Figura 15 – Modelo Curto dupla-fase-terra.



Fonte: Adaptado de (STEVENSON, 1986)

Então, com modelo equivalente é possível chegar às seguintes equações:

$$I_{a1} = \frac{E_{a1}}{Z_1 + Z_2(Z_0 + 3Z_f)/(Z_2 + Z_0 + 3Z_f)} \quad (3.24)$$

$$I_{a2} = -\frac{(Z_0 + 3Z_f)}{(Z_2 + Z_0 + 3Z_f)} I_{a1} \quad (3.25)$$

$$I_{a0} = -\frac{(Z_0 + 3Z_f)}{(Z_2 + Z_0 + 3Z_f)} I_{a1} \quad (3.26)$$

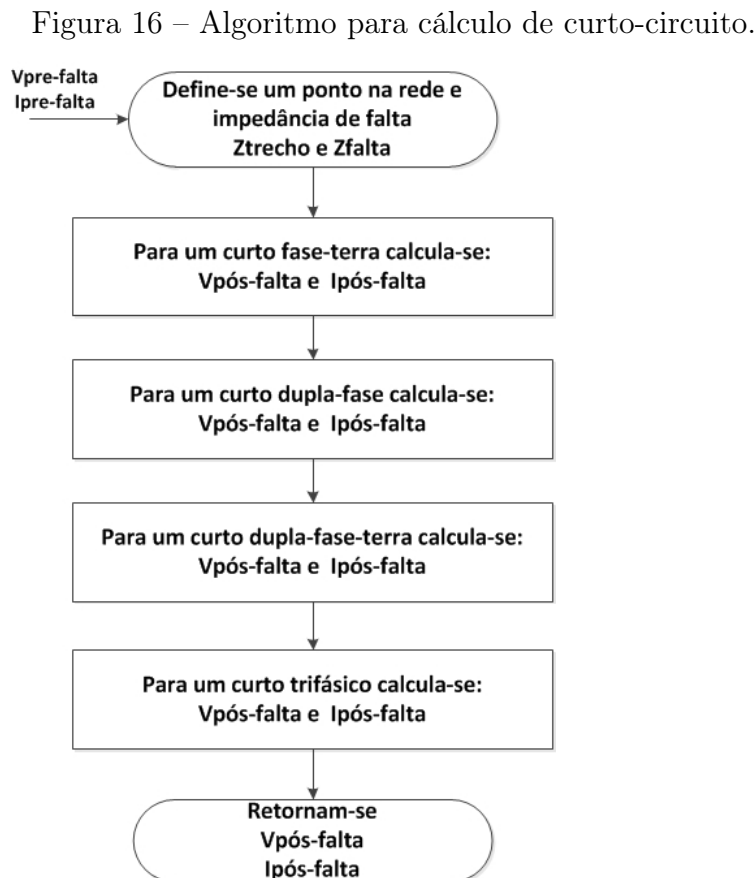
Com as componentes de sequência, aplica-se as equações 3.8 e 3.9, e determina-se as tensões e correntes nas fases da rede.

3.2.7 Algoritmo para Cálculo de Curto-Circuito

O cálculo de curto-circuito aplicado ao problema tem por finalidade informar os valores de tensão e corrente pós falta em todos os trechos e barras da rede sob ensaio.

Para simulação do curto-circuito é preciso primeiramente conhecer os valores pré-falta da rede. Para isso realiza-se o método explicado na seção anterior (Algoritmo Backward-Forward Sweep). Conhecidos os valores pré-falta, para a simulação, é preciso informar o local da rede onde será o curto e a impedância de falta. Através das equações descritas nas seções anteriores calcula-se todos os tipos de curto-circuitos, simultaneamente com o mesmo local e impedância de defeito. Assim, são conhecidos os valores pós-falta de tensão e corrente, caso um curto-circuito com estas características venha a ocorrer.

A Figura 16 ilustra o algoritmo implementado:



Fonte: Elaborado pelo autor.

O valor da impedância de falta abordado neste trabalho compreende valores entre 0 e 20 Ω , denominado Z_{falta} . O ponto onde será simulado o curto é denominado no algoritmo Z_{trecho} . Usando apenas os valores da reatância indutiva dos trechos da rede sob análise é montado um grafo, onde cada intervalo de valores contínuo representará um ponto exato. A codificação desta variável é apresentada detalhadamente no capítulo 5.

O objetivo do cálculo do curto-circuito é verificar se essa simulação apresenta similaridade com os valores que foram registrados por medidores dispostos na rede real na ocorrência de um curto. A relação indica que o ponto simulado pode estar próximo do ponto real de defeito. Por se tratar de um problema com variáveis contínuas, infinitas simulações poderiam ser realizadas para se localizar o ponto de defeito através desta comparação. Para isso, os métodos apresentados no próximo capítulo procuram diminuir este espaço de busca através de uma técnica de otimização.

4 Metodologias

4.1 Otimização Por Nuvem de Partícula

O método de otimização Particle Swarm Optimization-PSO, em português Otimização por nuvem de partículas, foi desenvolvido por Kennedy e Eberhart (1995) a partir de observações de bandos de pássaros e cardumes de peixes em busca de alimento (BRANDINI, 2007). Observou-se que seu deslocamento sofria influência da experiência do próprio indivíduo (fator de individualidade) e da experiência de todo grupo (fator social).

Sendo uma metaheurística evolucionária, difere de outras técnicas de computação evolucionária como algoritmos genéticos, pois a geração de uma nova população de indivíduos não se baseia em nenhum operador genético (OLIVEIRA; SILVA; ALOISE, 2004).

Nesta técnica, cada candidata a solução do problema, denominada partícula, representa um ponto no espaço de busca. Gerando-se inicialmente uma população de forma aleatória dentro do espaço de busca, a cada movimentação, as partículas se deslocam levando em consideração as suas melhores posições (pbest) e do grupo (gbest), que tendem ao longo do tempo a convergir para a mesma posição (alcançar o alimento).

Devido à fácil implementação e ao fato de não requerer informações referentes ao gradiente da função, a técnica torna-se aplicável com facilidade a problemas com variáveis contínuas, podendo também ser expandida à variáveis discretas (BRANDINI, 2007).

4.1.1 Fundamentos básicos

Cada posição da partícula corresponde a uma solução do problema. A cada iteração, cada partícula tem sua velocidade modificada em direção ao pbest (melhor posição da partícula) e gbest (melhor solução do bando). Este deslocamento da partícula é fundamentado em 3 parâmetros:

- Fator de sociabilidade: determina o peso de atração das partículas para a melhor solução já encontrada pelo bando;
- Fator de individualidade: determina o peso de atração de cada partícula em relação a melhor solução já encontrada por esta partícula;
- Velocidade máxima: determina o passo máximo, fazendo o movimento direcional e determinado.

Na estrutura do algoritmo é preciso também determinar o número de partículas e critério de parada.

Sendo cada partícula um ponto no espaço N-dimensional, $X_i = (X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{in})$, a melhor posição da i-ésima partícula é representada da forma

$$P_i = (P_{i1}, P_{i2}, \dots, P_{in}) \quad (4.1)$$

A velocidade e posição das partículas podem ser determinadas pelas seguintes equações:

$$V_{id} = W * V_{id} + c1 * rand() * (P_{id} - X_{id}) + c2 * Rand() * (P_{gd} - X_{id}) \quad (4.2)$$

$$X_{id} = X_{id} + V_{id} \quad (4.3)$$

onde:

Pgd: Melhor solução encontrada pelo bando;

Pid: Melhor solução encontrada pela partícula i.

c1 e c2: são constantes positivas que controlam o grau de atração para Pbest e Gbest.

W: é o fator de inércia.

rand() e Rand(): compreendem conjunto de valores aleatórios entre [0,1].

Através da equação 4.2, calcula-se a nova velocidade da partícula baseada na velocidade anterior e nas distâncias entre sua posição atual e as melhores soluções encontradas pela partícula e pelo conjunto de partículas. O peso de inércia (W) é responsável por determinar a influência da velocidade anterior na atual velocidade. Com um valor de "W" maior, amplia-se a busca a uma busca mais generalizada (global), enquanto um valor menor privilegia uma busca local (OLIVEIRA; SILVA; ALOISE, 2004).

Os valores dos parâmetros c1 e c2 são geralmente ajustados por tentativa e erro, compreendendo valores entre 0 e 2 (BRANDINI, 2007). Sendo c1 uma ponderação à influência "cognitiva", e c2 uma ponderação à influência "social".

O algoritmo ONP pode ser descrito da seguinte forma:

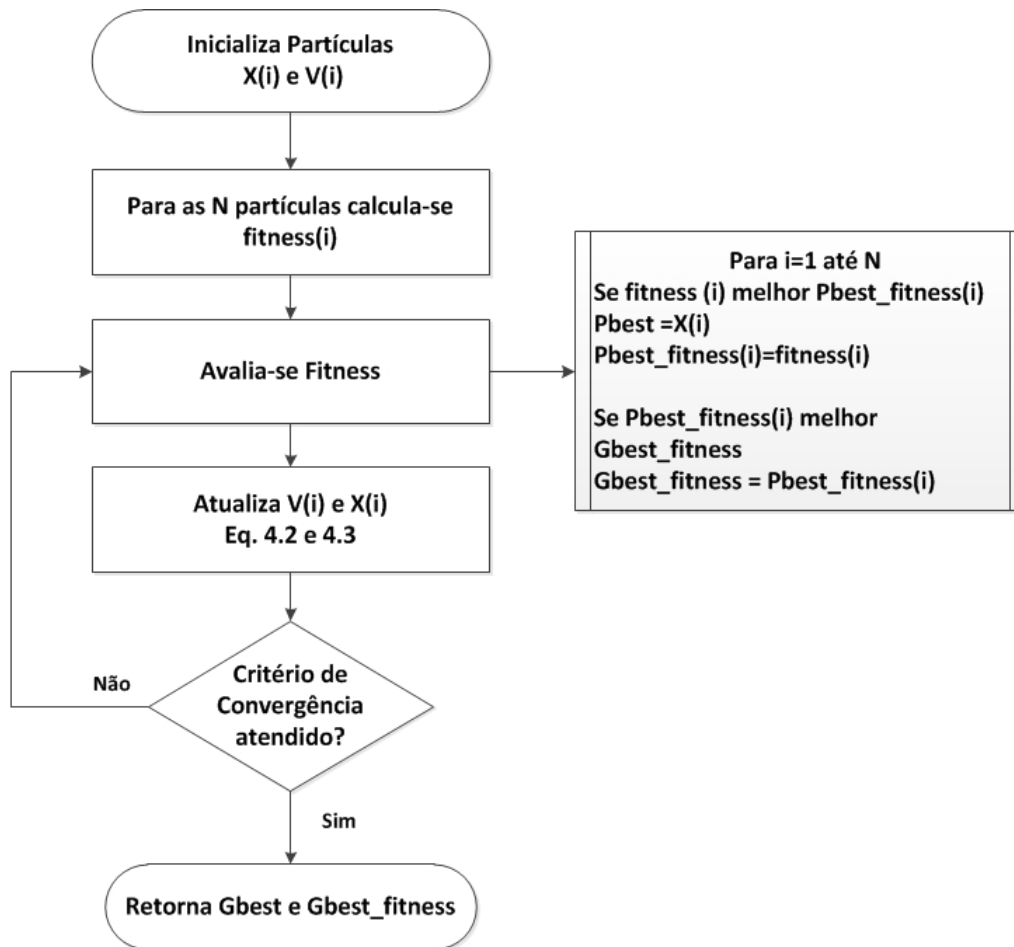
- i. Inicializa-se a população, posições e velocidades das partículas de forma aleatória em um espaço n dimensional .
- ii. Para cada partícula, avalia-se o fitness (função objetivo). Se o fitness corrente é melhor que o fitness para Pbest, faz-se Pbest igual a solução corrente ($Pbest(i)=X(i)$).
- iii. Compara-se o fitness de Gbest com o fitness de Pbest de cada partícula. Se o fitness de Pbest(i)é melhor que o para Gbest, atualiza-se Gbest.
- iv. Atualiza-se os vetores Velocidade e posição conforme as equações 4.2 e 4.3.
- v. Retorna-se ao passo "ii", até atingir critério de parada.

O critério de parada não é definido na metodologia. Utilizar apenas um número máximo de iterações, ou número máximo de iterações desde que foi encontrado um novo ótimo para o problema, são exemplos de critério de parada que podem ser aplicados à metodologia proposta.

A Figura 17 ilustra o algoritmo Otimização por Nuvem de Partícula. Para a Figura 17 as variáveis representam:

- $fitness(i)$: avaliação da função objetivo da partícula i ;
- $Pbest_fitness(i)$: avaliação da função objetivo para o Pbest da partícula i ;
- $Gbest_fitness$: avaliação da função objetivo para Gbest.

Figura 17 – Fluxograma do Método ONP.



Fonte: Adaptado de (OLIVEIRA; SILVA; ALOISE, 2004)

O critério de convergência utilizado na implementação do algoritmo aplicado na localização de faltas, que será descrito no capítulo 4, consiste em estabelecer o máximo de iterações desde a última atualização da solução ótima. Em sua forma original, o critério de convergência é atingido quando se chega ao fitness alvo (custo determinado), que é parâmetro de entrada para o programa. Sendo este valor desconhecido, outro critério de convergência precisa ser aplicado.

4.1.2 Aplicação da ONP para minimização de funções

Para validar a eficiência da técnica ONP implementada foram avaliadas expressões com soluções ótimas conhecidas, apresentadas na Tabela 2. Definindo-se o intervalo de busca, a técnica deverá encontrar uma combinação de x_1 e x_2 que retorne o menor valor para a função. São estas:

Tabela 2 – Expressões para minimizar

Nome da Função	Intervalo	Função	Ótimo
Goldstein & Price	[-2,2]	$\min F = [1 + (x_1 + x_2 + 1)^2(19 - 14x_1 + 3x_1^2 - 14x_2 + 6x_1x_2 + 3x_2^2)]$ $X[30 + (2x_1 - 3x_2)^2(18 - 32x_1 + 12x_1^2 + 48x_2 - 36x_1x_2 + 27x_2^2)]$	X(0,-1) F=3
Martin & Gaddy	[0,10]	$\min F = (x_1 - x_2)^2 + ((x_1 + x_2 - 10)/3)^2$	X(5,5) F=0
Rosenbrock	[-1,2 1,2]	$\min F = 100(x_1^2 - x_2)^2 + (1 - x_1)^2$	X(1,1) F=0

Conforme descrito em 4.1.1, o espaço de busca para estes exemplos correspondem a um campo bidimensional, ou seja, X é um vetor de duas posições " $X = [x_1 \ x_2]$ ". Os valores utilizados para este teste foram: fator de inércia " w " igual a 0,8, constantes de fator cognitivo " c_1 " e social " c_2 " iguais a 0,5. A população de partículas foi definida como $N=10$. Foi definido como critério de convergência para todos os casos um número máximo de 10 iterações sem melhoria da solução ótima.

Assim, seguindo os passos do fluxograma apresentado na Figura 17, um exemplo das etapas do algoritmo utilizando os parâmetros descritos acima ($w=0,8 \ c_1, c_2=0,5$), e uma população $N=3$ aplicado a expressão "Rosenbrock" é descrita a seguir.

Exemplo da técnica ONP para minimização da função "Rosenbrock".

Passo 1- Geração inicial da população de partícula e velocidade.

Para a população de partícula, o espaço de busca compreende o intervalo de -1,2 a 1,2. Assim, gera-se de forma aleatória as partículas.

Tabela 3 – Geração inicial das partículas

Partícula	x1	x2
1	0,2242	-0,5347
2	-0,8512	-0,3312
3	0,7861	0,1428

A inicialização da velocidade pode ser feita de forma aleatória. Neste exemplo, definiu-se inicialmente como zero.

Etapa 2- Avaliação da adequação da partícula

O cálculo da função objetivo foi realizado substituindo os valores de x1 e x2 na equação 4.4.

$$F = 100(x_1^2 - x_2)^2 + (1 - x_1)^2 \quad (4.4)$$

Assim, para as três partículas geradas, temos:

Tabela 4 – Avaliação da função objetivo

Partícula(i)	fitness(i)
1	34,8231
2	114,9060
3	22,6257

Na primeira iteração, Pbest da partícula i é igual a X(i). A partir da primeira iteração, deve-se avaliar se a solução corrente é melhor do que Pbest. Se for, atualiza Pbest e *Pbest_fitness*.

Através da tabela 4, para a iteração 0, vemos que a partícula 3 apresenta melhor adequação, assim:

G_{best}	0,7861	0,1428
------------	--------	--------

$G_{best_fitness}$	22,6257
---------------------	---------

A partir da primeira iteração, avalia-se todos os *Pbest_fitness(i)*. Se for melhor que *Gbest_fitness*, atualiza-se Gbest e *Gbest_fitness* para Pbest e *Pbest_fitness(i)* respectivamente.

Etapa 3 - Verificar critério de convergência

O critério de convergência utilizado foi permanecer no máximo dez iterações sem melhoras na solução ótima (G_{best}). Atingido o critério de convergência, encerra-se e retorna G_{best} e $G_{best_fitness}$. Não atendido o critério, vai à próxima etapa.

Etapa 4 - Atualização da velocidade e posição das partículas.

Para a partícula 1 temos:

$$V(1) = 0,8 * [0,0] + 0,5 * [[0,2242, -0,5347] - [0,2242, -0,5347]] + 0,5 * [[0,7861, 0,1428] - [0,2242, -0,5347]] \quad (4.5)$$

$$V(1) = [0,2809, 0,3388] \quad (4.6)$$

$$X(1) = [0,2242, -0,5347] + [0,2809, 0,3388] \quad (4.7)$$

$$X(1) = [0,5052 - 0,1960] \quad (4.8)$$

Aplicando a equação a todas as partículas, temos:

Tabela 5 – Atualização da velocidade

Partícula	v1	v2
1	0,5052	-0,1960
2	-0,0326	-0,0942
3	0,7861	0,1442

Tabela 6 – Atualização da posição

Partícula	x1	x2
1	0,2809	0,3388
2	0,8187	0,2370
3	0	0

Após a atualização, retorna-se à etapa 2, avaliando novamente a adequação da partícula e atualizando os valores de P_{best} e G_{best} quando apresentar melhor resultado. A busca se encerra após dez iterações sem melhoria de G_{best} .

G_{best}	0,9999	0,9999
------------	--------	--------

$G_{best_fitness}$	1,3867e-7
---------------------	-----------

Seguindo os passos descritos, os resultados encontrados são mostrados na Tabela 7

Tabela 7 – Resultados da minimização aplicando ONP

Expressão	Vetor Solução	Valor da Função Objetivo
Goldstein & Price	$X = [0,0016 \ -0,9935]$	$F = 3,0167$
Martin & Gaddy	$X = [5 \ 4,99]$	$F = 2,0363e-9$
Rosenbrock	$X = [1,0088 \ 1,0174 \]$	$F = 8,5137e-5$

Para solução do problema de localização de faltas, "x1" será uma variável contínua que representará um ponto específico da rede e "x2" será a impedância de falta, que serão explicados no capítulo 5. Utilizando os valores x1 e x2, será simulado curto-circuito na rede. Este curto irá gerar um valor de tensão correspondente nas barras da rede, que será comparado com o valor registrado pelos medidores. Quanto menor a diferença, mais próximo a simulação está do curto-real, se tratando então de um problema de minimização.

4.2 Variable Neighborhood Search - VNS

A meta-heurística VNS é uma técnica de busca local, que por meio de transições sistemáticas de estruturas de vizinhança explora o espaço de busca (REIS, 2013). Esta técnica realiza uma busca não orientada, explorando vizinhanças cada vez mais distantes da solução atual, caso não tenha melhora da solução corrente.

A técnica proposta para solução do problema do caixeiro viajante por MLADENOVIC e HANSEN (1997), denominada VNS básico, apresentou excelentes resultados para este problema.

A eficiência na utilização da técnica requer conhecimento para geração de uma solução inicial, definição de estruturas e critério de convergência. Compreender estes conceitos é fundamental para sua aplicação.

4.2.1 Fundamentos Básicos

A partir de uma solução inicial s_0 aleatória, gera-se uma perturbação, selecionando um vizinho s' dentro da vizinhança $N^k(s)$, definida dentro de sua estrutura de vizinhança de ordem k ($1 \leq k \leq r$), a partir da solução atual. Então, a partir deste vizinho criado por perturbação da solução ótima, é realizado uma busca local em torno de s' .

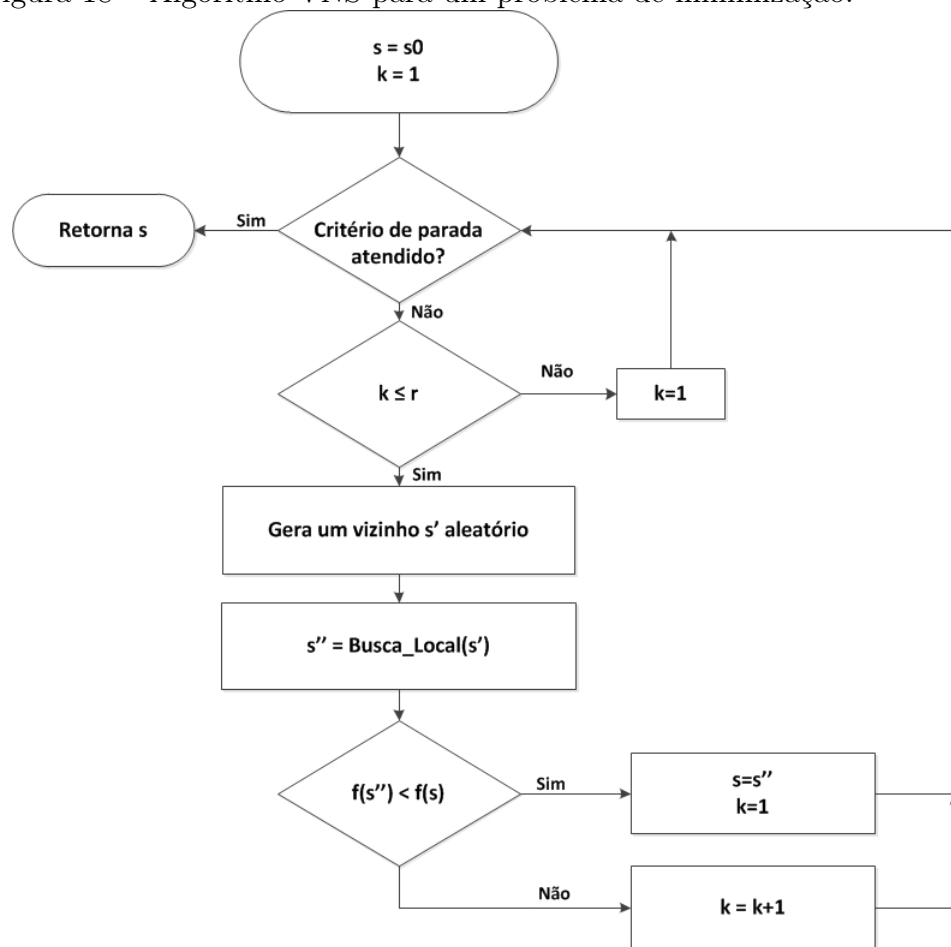
Sendo s'' um vizinho de s' , se este for melhor que a solução atual, ou seja, se $f(s'') < f(s')$ atualiza-se a solução e se retorna à primeira estrutura de vizinhança. Caso contrário, segue para a próxima estrutura $N^{k+1}(s)$ encerrando a busca quando k for equivalente a r , ou algum critério de parada for atendido.

O critério de parada pode ser tempo de processamento, número de iterações, ou número máximo de iterações sem melhora da solução corrente (REIS, 2013). A definição de um critério de parada deve ser avaliada de acordo com as especificações de cada problema.

A Figura 18, apresenta o algoritmo VNS clássico aplicado ao problema de minimização. As variáveis apresentadas no fluxograma são descritas como:

- s_0 é a solução inicial
- s é a solução atual
- r representa o número de estruturas de vizinhanças
- k é a estrutura de vizinhança corrente

Figura 18 – Algoritmo VNS para um problema de minimização.



Fonte: Adaptado de (REIS, 2013)

A solução vizinha é gerada respeitando os limites de cada estrutura de vizinhança. Caso não resulte em melhora com soluções vizinhas da estrutura de vizinhança corrente $N^k(s)$, são explorados os vizinhos da próxima estrutura de vizinhança, $N^{k+1}(s)$ até os vizinhos de $N^r(s)$ (r representa o número de estruturas de vizinhanças). Este passos são repetidos até que algum critério dos mencionados anteriormente seja atendido (REIS, 2013).

Outras extensões ao VNS básico como: VNS de descida (VND), VNS reduzido (RVNS) e VNS geral (GVNS) foram abordadas pelos autores MLADENOVIC e HANSEN (1997) em anos posteriores. Neste trabalho foi implementado e avaliado o VNS básico.

4.2.2 Aplicação da VNS para minimização de funções

Para validar a eficiência da técnica VNS implementada, foram avaliadas as mesmas expressões aplicadas a técnica ONP, tabela 2.

Conforme seção 4.2.1, foram considerados quatro estruturas de vizinhança. Na primeira estrutura $N_1(s)$, as variações em torno da solução corrente podem ser de $\pm 2,5$ %. Na segunda estrutura ± 10 % da solução corrente, na terceira ± 20 % e na quarta ± 50 , % aumentando o raio de busca procurando sair de ótimos locais.

Assim, utilizando novamente a expressão "Rosenbrock", serão explicados os passos através de um exemplo, e os resultados finais apresentados em seguida.

Exemplo da técnica VNS para minimização da função "Rosenbrock".

Etapa 1 - Geração da solução inicial

Primeiramente considera-se uma solução inicial aleatória e a avaliação da função para $f(s_0)$

$$s_0 = \boxed{-,03118 \quad 0,6343}$$

$$f(s_0) = \boxed{30,56}$$

Etapa 2 - Busca Local

Conforme explicado em 4.2.1, a busca local depende da estrutura de vizinhança e da solução corrente. Assim, para $N^1(s)$ temos:

$$s' = \boxed{-0,2747 \quad 0,6005}$$

Na busca local é gerado um vizinho a cada iteração. Caso este vizinho (s') seja melhor que a solução corrente s , faz-se $s=s'$. Caso não seja melhor, conta-se uma iteração sem melhoria da solução ótima, geram-se novos vizinhos na mesma estrutura de vizinhança até atingir o limite de iterações sem melhoria dentro desta estrutura (3000 mil para este problema).

Etapa 3 - Avaliação da função objetivo

Substituindo os valores de x_1 e x_2 na função de "Rosenbrock":

$$f(s') = \boxed{29,19}$$

Com $f(s') < f(s)$ atualiza-se $f(s)$ para $f(s')$.

Quando atingir o limite de 3.000 iterações sem melhoria, faz-se $k=k+1$ e realiza uma nova busca local considerando a nova estrutura em vigor. Encerra-se a busca quando

atingir o limite de iterações para a última estrutura de vizinhança, neste caso, atingir dez iterações sem melhoria na estrutura $N^1(s)$.

Etapa 4 - Critério de convergência

De acordo com o item 4.1.2, o critério de convergência definido para o problema foi parar quando atingir o número máximo de estrutura de vizinhança, ou seja, $k=4$. Não atingido o critério de convergência, retorna-se a etapa 2.

Os resultados finais encontrados para o VNS são mostrados na Tabela 8.

Tabela 8 – Resultados da minimização aplicando VNS

Expressão	Vetor Solução	Valor da Função Objetivo
Goldstein & Price	$X = [-0,0022 \ 0,9957]$	$F = 3,011$
Martin & Gaddy	$X = [5,0124 \ 5,0090]$	$F = 6.2976e-05$
Rosenbrock	$X = [0,9920 \ 0,9768]$	$F = 0,0052$

Para utilização do VNS no problema de localização, na etapa de busca local, foram definido N vizinhos gerados a cada iteração. As estruturas de vizinhança também precisaram ser adaptadas ao problema conforme descrito na seção 5.6.

5 Aplicação das Técnicas VNS e ONP para Solução dos Problemas de Localização

Escolher um método a ser aplicado depende da disponibilidade de instrumentos dispostos na rede e o valor de investimento desejado pela empresa, assim, pode-se determinar um método adequado, partindo dos princípios de custo-benefício.

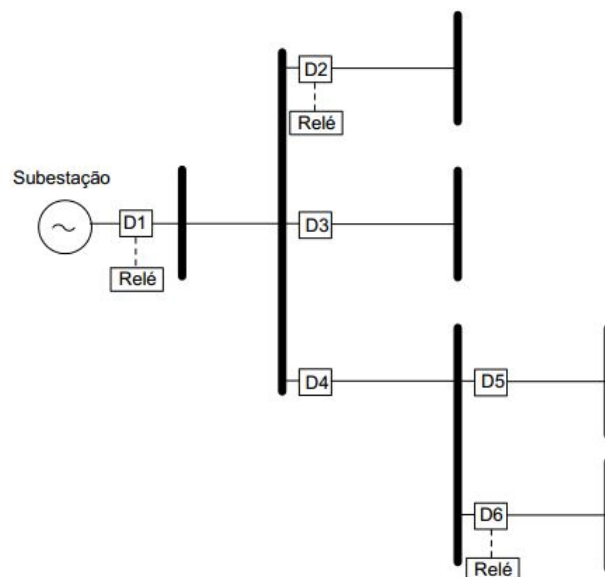
Neste trabalho, o método proposto consiste em localizar o defeito utilizando os dados de tensão e corrente de frequência fundamental, medidos através de um dispositivo específico para tal finalidade. Pensando nas configurações atuais da rede, foram dispostos três instrumentos de medição que fornecem informações simultâneas.

As considerações para implementação do algoritmo são descritas nas próximas seções.

5.1 Medições

Para localização do ponto de falta, os dados de interesse são fasores de tensão e corrente de frequência fundamental. Os relés digitais modernos, também conhecidos como dispositivos eletrônicos inteligentes (IED's), fornecem além de outros dados esta informação. OS IED's serão alocados em alguns pontos estratégicos da rede, onde se tem ramificações. A Figura 20 ilustra a instalação de IED's para medição destes valores.

Figura 19 – Relés para medição dos fasores de tensão e corrente.



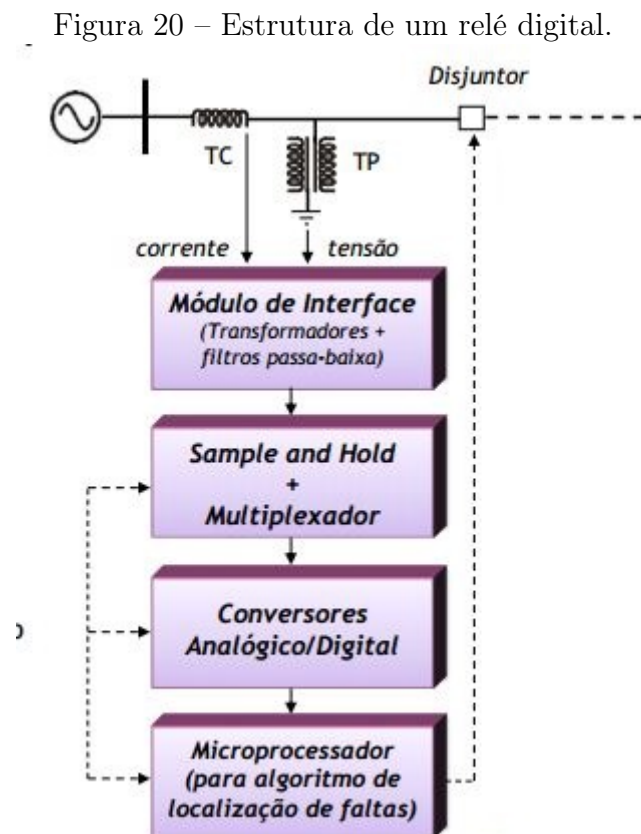
Como o método proposto para localização de faltas utiliza dados provenientes de mais de um terminal, é preciso que dados coletados por todos os IED's tenham a mesma referência de tempo. Estes dispositivos permitem um sistema de sincronismo por GPS (Global Positioning system) e podem se comunicar com uma central através de rede ethernet.

5.1.1 Medição de tensão e corrente

A estrutura de um relé digital compreende:

- Transdutores (TP's e TC's)
- Modulos de Interface
- Multiplexadores
- Conversores A/D
- Processador

A Figura 20 mostra o processo de leitura e tratamento de dados destes dispositivos.



Fonte: (COURY et al., 2012)

Os algoritmos de localização de faltas podem ser implementados no próprio dispositivo, ou este pode apenas coletar os dados para serem processados por uma outra central. Como neste trabalho, para localização, serão utilizados dados de mais de um terminal, o algoritmo de localização de faltas será para aplicação em uma central. A forma como os dados são coletados e enviados à central não são foco deste trabalho.

Para se conhecer a magnitude dos valores de tensão e corrente, serão considerados os dispositivos descritos na seção anterior. Através dos dados amostrados de tensão, pode-se aplicar a transformada de Fourier ou utilizar a equação 5.1, para calcular a magnitude desse parâmetro.

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} v_i^2} \quad (5.1)$$

onde:

$v(i)$: valor de tensão instantânea

n : quantidade de amostras por ciclo

5.1.2 Medição Sincronizada

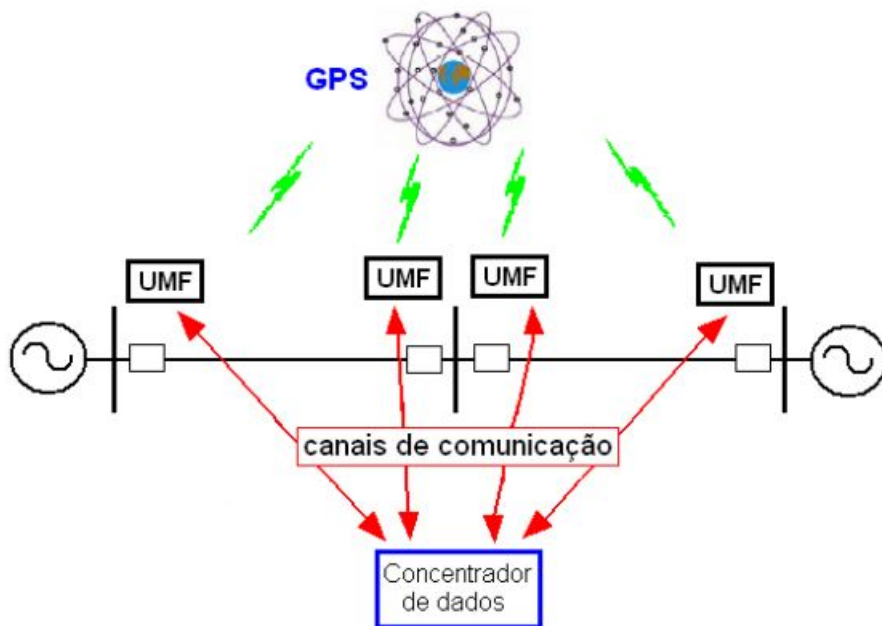
Para métodos de localização que obtém dados de mais de um terminal, é preciso que estes dados tenham a mesma referência de tempo. Para isso, faz-se necessário um sistema de medição sincronizado, em tempo real, onde dados obtidos em pontos geograficamente distantes entre si sejam avaliados, em relação a mesma referência absoluta de tempo.

Esse sistema de medição sincronizado é composto por:

- Unidade de medição fasorial (UMF) - Tem por função coletar os dados, processar e enviar ao concentrador de dados. Possui receptor GPS, para que estes dados tenham a mesma referência absoluta de tempo.
- Concentrador de dados fasoriais (CDF)- Recebe os dados dos diferentes pontos de medição (UMF), formata e organiza as medições.
- Global Positioning System (GPS) - Responsável por emitir sinais de pulso para estações receptoras, a cada segundo, que a partir deste sinal recebido sabem o instante exato de aquisição dos dados.
- Canais de comunicação - Responsável basicamente pela transferência de dados entre UMFs e o CDF.

A Figura 21 ilustra o sistema de medição.

Figura 21 – Medição sincronizada.



Fonte: (MARTINS, 2012)

5.2 Codificação das Variáveis

Um vetor solução para as técnicas de otimização ONP e VNS é dado por um vetor de duas dimensões:

$$X = [Z_{trecho_Acumulado} \quad Z_{falta}]$$

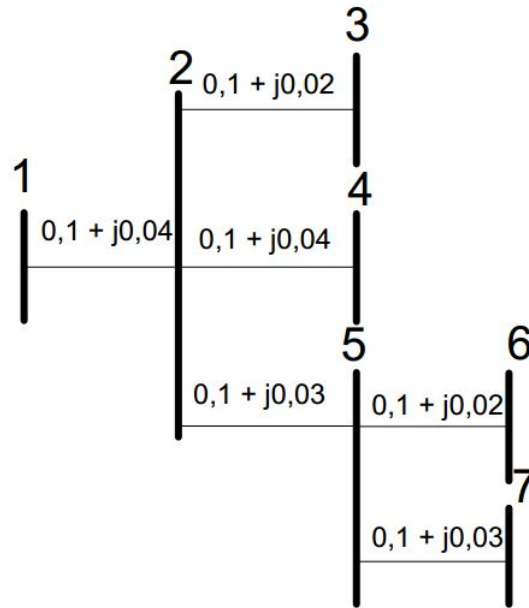
onde:

Z_{falta} representa a impedância de contato de um objeto (exemplo: árvore) em contato com a parte energizada e a terra. Neste trabalho, foram considerados defeitos com impedância entre 0 e 20 Ω .

$Z_{trecho_Acumulado}$ representa uma posição no sistema de distribuição.

A correlação de $Z_{trecho_Acumulado}$ a uma posição no sistema foi realizada criando um grafo acumulativo das reatâncias indutivas dos trechos, conforme a figura 22. Assim, esta variável será contínua dentro deste intervalo acumulado, se adequando ao problema em questão.

Figura 22 – Rede de Distribuição para Exemplo.



Fonte: Elaborado Pelo Autor

Então, a partir da Figura 22, obtém-se:

Tabela 9 – Montagem de Ztrecho

Trecho	jX do Trecho (Ω)	jX Acumulada (Ω)	Intervalo (Ω)
1-2	0,04	0,04	0 a 0,04
2-3	0,02	0,06	0,04 a 0,06
2-4	0,04	0,1	0,06 a 0,1
2-5	0,03	0,13	0,1 a 0,13
5-6	0,02	0,15	0,13 a 0,15
5-7	0,03	0,18	0,15 a 0,18

A partir da codificação da Tabela 9, todos os trechos da rede podem ser representados em um intervalo contínuo de valores. O espaço geral de busca, considerando que foram estudados curtos com Z_{falta} de até 20Ω , compreende os valores:

$$X = [0 - 0,18 \quad 0 - 20]$$

Como exemplo, dada uma condição de falta em qualquer ponto do trecho 2-4 e com uma impedância de falta (à terra) igual a 15 ohms. Esta é representada da seguinte forma:

$$X = [0,06 - 0,1 \quad 15]$$

Neste trabalho, 'X' contém as informações necessárias para o cálculo de curto-circuito descrito no capítulo 3. O valor de 'X' informa o local e valor da impedância de falta no qual se deve simular o curto. A simulação retornará valores de V e I pós-falta

que serão utilizados para cálculo da função objetivo. A função objetivo será detalhada na seção a seguir.

5.3 Função Objetivo para o Problema de Localização de Falta

Este é um problema de minimização. A avaliação da função objetivo consiste em comparar os valores simulados de curto-circuito com os valores registrados pelos instrumentos dispostos na rede (relés digitais). Assim, quanto mais próximo o ponto simulado estiver do ponto real de curto, menor será o valor da função objetivo. A função objetivo do problema pode ser calcular a distância entre os valores medidos (PEREIRA, 2007). Assim a função objetivo será:

$$f.o = \min\left(\sum_{i=1}^n (V_{ai} - Vsim_{ai})^2 + (V_{bi} - Vsim_{bi})^2 + (V_{ci} - Vsim_{ci})^2\right) \quad (5.2)$$

onde:

- n , representa o número de medidores dispostos na rede;
- V_{ai}, V_{bi} e V_{ci} , representam os valores de tensão pós-falta registrados pelos medidores nas fases a,b e c respectivamente;
- $Vsim_{ai}, Vsim_{bi}, Vsim_{ci}$, representam os valores de tensão pós-falta simulados nas fases a,b e c respectivamente.

5.4 Aplicação de ONP ao Problema de Localização

Etapa 1 - Determinação dos valores pré-falta

O primeiro passo na localização de falta é saber o ponto de operação da rede antes da ocorrência do defeito. Deseja-se conhecer os valores de tensão e corrente de frequência fundamental, pois estes valores serão utilizados na próxima etapa. Através da execução do fluxo de potência descrito no capítulo 2, obtém-se um vetor com valores de tensão e corrente trifásicos como mostrado a seguir:

$$V = \begin{bmatrix} V_{a1} & V_{a2} & V_{a3} & \dots & V_{an} \\ V_{b1} & V_{b2} & V_{b3} & \dots & V_{bn} \\ V_{c1} & V_{c2} & V_{c3} & \dots & V_{cn} \end{bmatrix}$$

onde:

- n representa o número de barras; e,
- V_{an}, V_{bn}, V_{cn} representam a tensão nas fases a, b e c, respectivamente.

$$I = \begin{bmatrix} I_{a1} & I_{a2} & I_{a3} & \dots & I_{an} \\ I_{b1} & I_{b2} & I_{b3} & \dots & I_{bn} \\ I_{c1} & I_{c2} & I_{c3} & \dots & I_{cn} \end{bmatrix}$$

onde:

- n representa o número de trechos; e,
- I_{an}, I_{bn}, I_{cn} representam as correntes nas fases a, b e c, respectivamente.

Os trechos são numerados de forma crescente de (1 a n), seguindo a ordem de inserção (tabela 9) .

Etapa 2 - Inicializações das Partículas e Velocidades

Cada partícula representa uma possível solução para o problema. Neste caso, a partícula X_{id} tem dimensão dois, conforme explicado no item 5.3 deste capítulo. Assim, utilizando o exemplo da tabela 9 para gerar 4 partículas aleatórias, as partículas poderiam assumir os seguintes valores:

Tabela 10 – Geração Aleatório das Partículas

Partícula 1	0,0035	5,5385
Partícula 2	0,0051	1,9426
Partícula 3	0,0914	13,8966
Partícula 4	0,0352	19,0044

Para reforçar, a primeira posição de cada partícula é Z_{trecho} e a segunda Z_{falta} .

As velocidades foram inicializadas com zero, mas poderiam ser inicializadas com valores aleatórios.

Tabela 11 – Geração Aleatório Velocidades

Vel. Partícula 1	0	0
Vel. Partícula 2	0	0
Vel. Partícula 3	0	0
Vel. Partícula 4	0	0

Etapa 3 - Cálculo do Curto-Circuito e Função Objetivo

Para simular o curto-circuito é preciso conhecer os valores pré-falta (Etapa 1), e indicar o local e a impedância de falta (Etapa 2). Assim, através das equações descritas no capítulo 3, calcula-se as correntes e tensões pós-falta em todas as barras e trechos da rede de distribuição. Para avaliar a função objetivo compararam-se valores de tensão onde se tem medidores na rede real com as respectivas barras na simulação. Para o caso de três medidores instalados, para cada tipo de curto simulado nesta etapa, haverá uma tabela como a seguir:

Tabela 12 – Valores de tensão reais e medidos

	Va(medidor)	Vb(med.)	Vc(med.)	Va(simulado)	Vb(sim.)	Vc(sim.)
Barra 1	0,4899	1,0029	1,1426	0,3160	1,0421	1,1479
Barra 3	0,4713	0,9858	1,1175	0,2648	1,0179	1,1471
Barra 6	0,4493	0,9532	1,0943	0,2189	0,9786	1,1285

Para exemplo foi acrescentado uma medição de corrente no trecho 1-2. Assim, acrescentam-se a função objetivo (Eq. 5.2) valores reais e simulados conforme tabela 13.

Tabela 13 – Valores de corrente reais e medidos

	Ia(medidor)	Ib(med.)	Ic(med.)	Ia(simulado)	Ib(sim.)	Ic(sim.)
Trecho 1-2	13,3487	5,8853	2,3348	14,6327	6,8502	1,5704

São simulados para cada partícula todos os tipos possíveis de curto e então avalia-se a função objetivo conforme a equação 5.2. Por se tratar de um problema de minimização, o menor valor para cada partícula corresponde ao P_{best} e o menor valor entre todas as partículas corresponde ao G_{best} .

Tabela 14 – Avaliação da função objetivo para cada partícula e tipo de curto

Partículas	Função Objetivo			
	Curto 3ϕ	Curto 2ϕ	Curto 2ϕ -terra	Curto ϕ -terra
Partícula 1	132,58	395,79	118,06	3,29
Partícula 2	128,75	355,37	117,17	4,84
Partícula 3	111,97	293,79	113,30	2,32
Partícula 4	88,92	224,86	107,33	14,29

Na primeira iteração, P_{best} será igual a 'X' para cada partícula, pois é a melhor posição visitada até o momento. G_{best} será a posição da partícula com melhor fitness (Partícula 3 no exemplo). Assim:

$$\boxed{G_{best} \quad 0,0914 \quad 13,8966}$$

$$\boxed{G_{best_fitness} \quad 2,32}$$

Etapa 4 - Verificar Critério de Convergência

O critério de convergência utilizado foi permanecer no máximo cem iterações sem melhoras na solução ótima (G_{best}). Atingido o critério de convergência, encerra-se e retorna G_{best} . Não atendido o critério, vai à próxima etapa.

Etapa 5 - Atualização da posição e velocidade das partículas.

Não atendendo ao critério de convergência é preciso atualizar posição e velocidade de cada partícula. Para isso são utilizadas as equações 4.2 e 4.3. Os parâmetros da ONP para este exemplo e o problema em questão foram $\omega=0,4$, fator $c1=0,2$ e $c2=0,3$.

Para atualização da posição e velocidade da partícula 1, temos:

$$Vid = 0,4 * [0,0] + 0,2 * rand() * ([0,0035,5,5385] - [0,0035,5,5385]) + 0,3 * Rand() * ([0,0914,13,8966] - [0,0035,5,5385]) \quad (5.3)$$

$$Vid = [0,0193,1,8335] \quad (5.4)$$

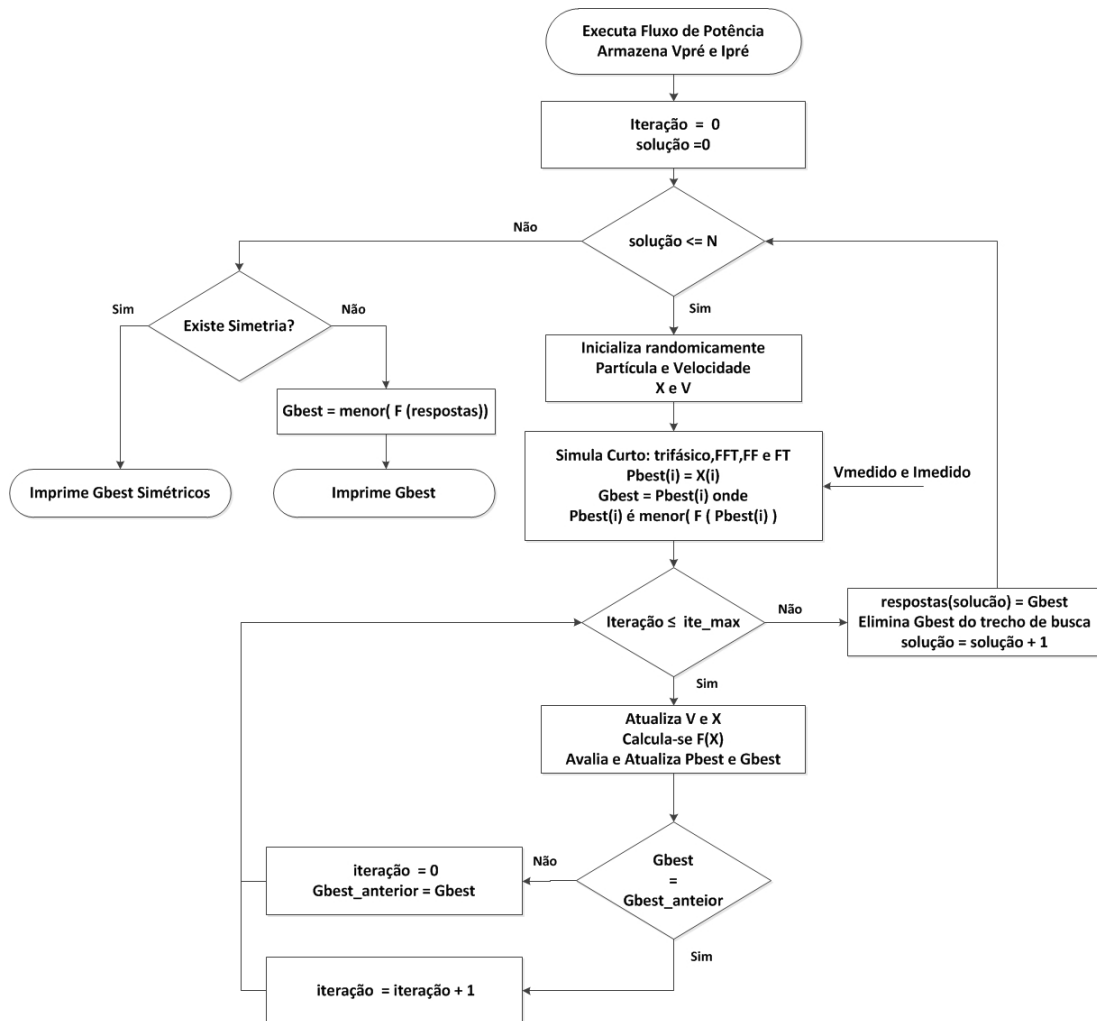
$$Xid = [0,0035,5,5385] + [0,0193,1,8335] \quad (5.5)$$

$$Xid = [0,0228,7,37] \quad (5.6)$$

Assim, retorna-se a etapa 3 até que o critério de convergência seja atendido.

O fluxograma da Figura 23 ilustra a aplicação da técnica.

Figura 23 – Algoritmo ONP para Localização.



onde:

N: representa o número de soluções pré-determinada a serem encontradas.

Devido à característica de simetria das redes de distribuição (derivações com valores similares de impedância), os medidores podem registrar valores de tensão pós-falta iguais para curtos em pontos diferentes da rede (pontos simétricos). Isso faz com que tenha mais de um ótimo para o problema na avaliação da função objetivo. Para contornar o problema, definiu-se N soluções a serem encontradas. Executa-se N vezes o algoritmo eliminando da busca os trechos que já foram encontrados como solução. Quando são encontradas pontos ótimos simétricos, a resposta compreende o conjunto de possíveis soluções. Quando não houver resultados simétricos, avalia-se entre as N respostas a que possui a melhor avaliação da função objetivo.

5.5 Aplicação de VNS ao problema de Localização

Foram definidas quatro estruturas de vizinhanças, iguais ao exemplo da seção 4.2.2. Em cada estrutura de vizinhança, os vizinhos gerados podem se distanciar da solução corrente conforme a Tabela 15.

Tabela 15 – Estruturas e definição de vizinhos

Estrutura	Ztrecho/Zfalta (%)
1	$\pm 2,5$
2	± 10
3	± 20
4	± 50

As etapas para solução por VNS são explicadas a seguir. Para exemplo de valores, considera-se a figura 22 e a tabela 9.

Etapa 1 - Determinação dos valores pré-falta

Consiste em determinar valores pré-falta da rede, igualmente explicado na etapa 1 do método ONP.

Etapa 2 - Geração de uma solução Inicial Aleatória

$$s_0 = \boxed{0,1 \mid 5}$$

Tabela 16 – Avaliação de $f(s_0)$

	Curto 3ϕ	Curto 2ϕ	Curto 2ϕ -terra	Curto 1ϕ
$f(s_0)$	100,21	254,74	110,52	16,59

Etapa 3 - Busca Local

Antes da primeira iteração tem-se $k=1$ e s_0 uma solução inicial aleatória, sendo assim:

Em cada estrutura de vizinhança ($N^k(s)$) podem ser geradas por iteração N soluções vizinhas. Caso alguma seja melhor que a solução corrente, atualiza-se a solução corrente ($s = s'$) e faz-se $k=1$. Caso contrário, conta-se o limite de 10 iterações sem melhora da solução corrente e então passa-se a próxima estrutura de vizinhança ($N^{k+1}(s)$).

Pode-se observar pela tabela 9 que o valor de s_0 , corresponde a um curto situado entre as barras 2 e 5, trecho com $jX=0,03$. Assim, de acordo com a tabela 15 para $N^1(s)$:

Etapa 4 - Cálculo de curto-circuito e avaliação da função objetivo.

Tabela 17 – Soluções vizinhas para $N^1(s)$

Vizinha 1	0,99	4,94
Vizinha 2	0,98	5,12

A etapa 4, é realizada de maneira semelhante à explicada para a ONP. Realizam-se os curto-circuitos com vizinhos gerados e calcula-se a função objetivo para todos os tipos de curto simultaneamente.

Tabela 18 – Avaliação da função objetivo para cada partícula e tipo de curto

Vizinhas	Função Objetivo			
	Curto 3ϕ	Curto 2ϕ	Curto 2ϕ -terra	Curto ϕ -terra
1	101,36	257,64	110,79	1,39
2	102,62	260,18	110,23	1,14

Se o valor da função objetivo para o vizinho(i) ($f(s')$) for melhor que $f(s)$, então faz-se $s = s'$ e $k=1$. Caso contrário, conta-se uma iteração sem melhoria da solução corrente. Após isso, retorna-se a etapa 3. Em cada estrutura permite-se 10 iterações sem melhoras, depois segue-se para a próxima estrutura até que k seja igual a r (r é numero de estruturas de vizinhança), encerrando assim o algoritmo.

Para este exemplo, atualiza-se e então retorna à etapa 3:

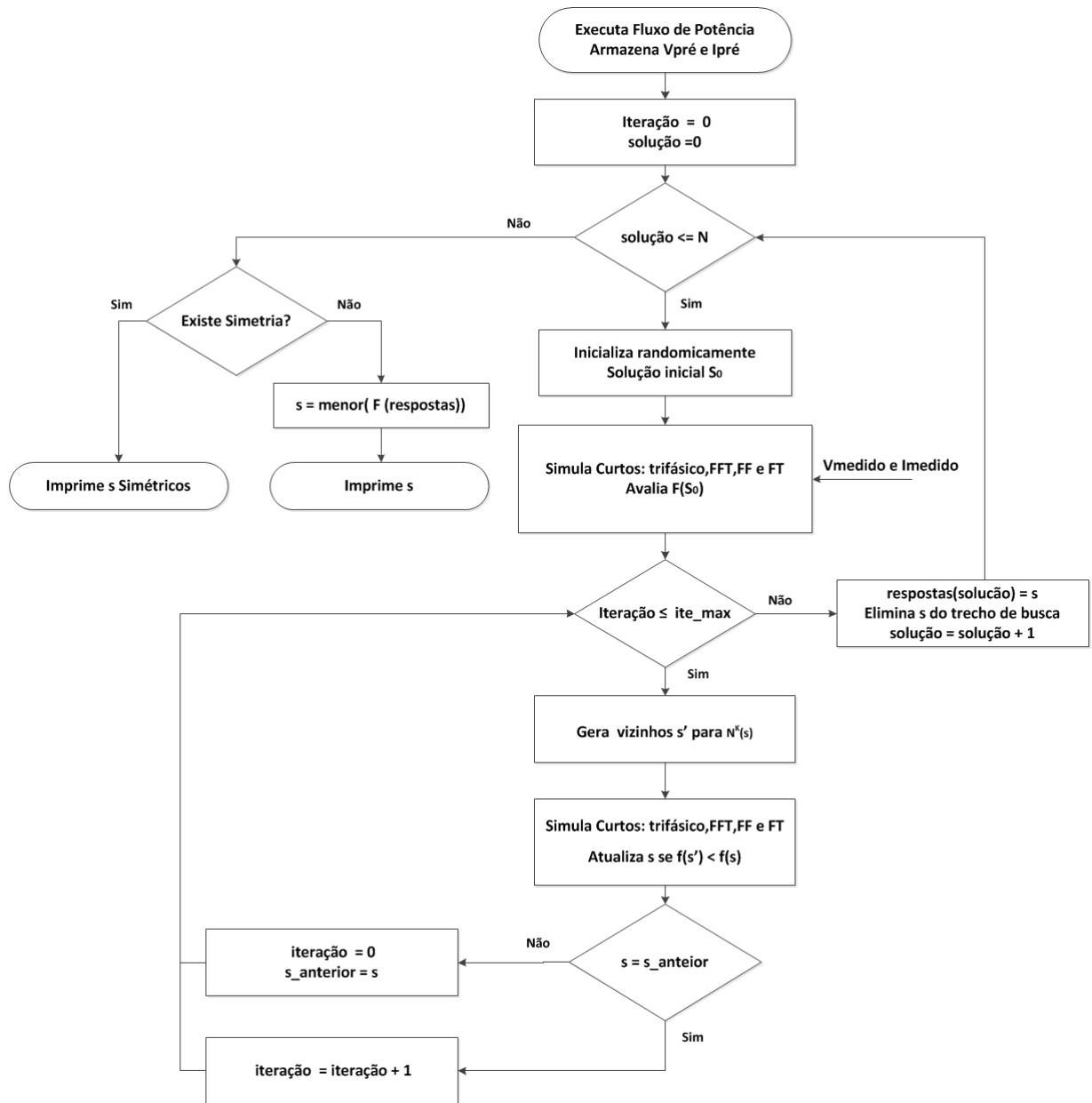
Tabela 19 – Atualização da solução corrente

$$s = \begin{array}{|c|c|} \hline 0,098 & 5,12 \\ \hline \end{array}$$

$$f(s) = \begin{array}{|c|} \hline 1,14 \\ \hline \end{array}$$

Uma ilustração da aplicação da técnica é apresentada na Figura 24

Figura 24 – Algoritmo VNS para Localização.



onde:

N: representa o número de soluções pré-determinada a serem encontradas.

6 Testes e Resultados

A metodologia foi aplicada em três redes elétricas: de 33 barras, do IEEE, 136 barras e 202 barras. A implementação computacional foi feita em Matlab, versão R2013a. Foi utilizado um computador core i7, 2,8Ghz e 6 Gb de memória RAM. Foram analisados diferentes parâmetros que medem a eficiência das metodologias, sendo estes: resultados, número de iterações, esforço computacional e sucesso da convergência. Também foram considerados diferentes cenários, com a finalidade de refletir de forma mais próxima a realidade.

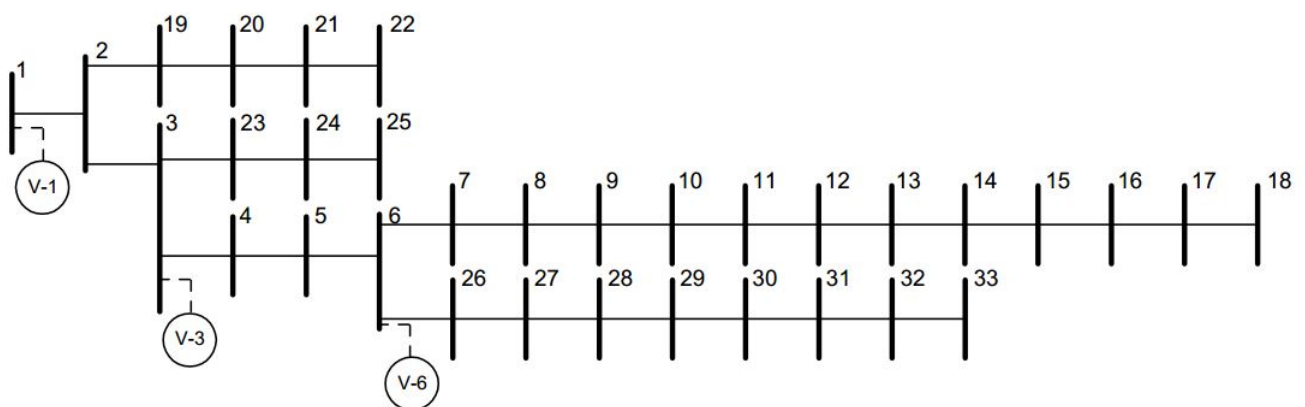
6.1 Rede de 33 barras

Esta rede ilustrada na Figura 25 possui 33 barras, 32 trechos e opera com uma tensão de 12,66 kV. Foram consideradas duas condições de falta: uma crítica (trifásica) e outra mais "leve"(monofásica com impedância de defeito).

Conforme 5.4 e 5.5, para as técnicas ONP e VNS e todas as redes aqui avaliadas (33, 136 e 202 barras) definiu-se como critério de convergência 20 iterações sem melhoria da solução corrente. Para ONP significa 20 gerações de partículas sem melhoria e para a VNS significa 20 gerações de vizinhos em cada estrutura sem melhora. O número de vizinhos gerados a cada iteração (para VNS) ou número de partículas (para ONP) foi definido como $N=15$ para todos os testes.

A figura 25 ilustra a rede de 33 barras e a alocação dos medidores:

Figura 25 – Rede de 33 barras.



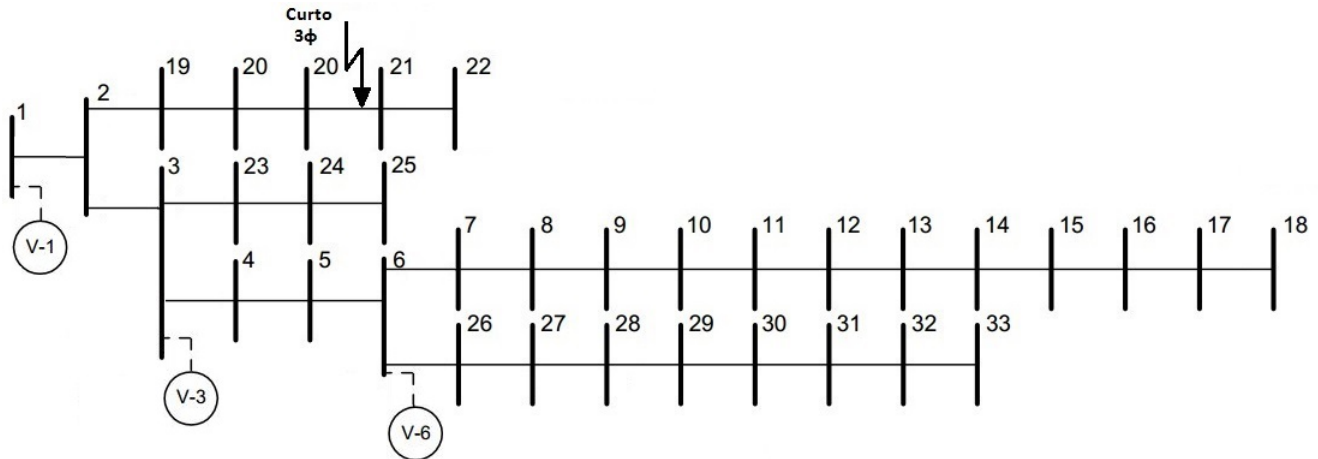
Teste 1

Tipo curto: Trifásico

Trecho: 20-21 à 77,85%

Zfalta: 0Ω

Figura 26 – Rede 33 barras.



Dados registrados pelos medidores: Tabela 20

Tabela 20 – Informações Registradas pelos Medidores

Ponto de Medição	Parâmetro medido	Canais de Medição		
		Fase "a"	Fase "b"	Fase "c"
Barra 1	$ V $ (p.u)	0,1469	0,1469	0,1469
Barra 3	$ V $ (p.u)	0.1279	0.1279	0.1279
Barra 6	$ V $ (p.u)	0.1052	0.1052	0.1052

Os valores registrados pelos medidos são característicos de um curto-trifásico. Um afundamento de tensão com valores iguais nas fases "a", "b" e "c."

Os resultados do teste 1 são mostrados nas Tabelas 21e 22 para os dois métodos desenvolvidos.

Tabela 21 – Resultados do Teste 1- Rede de 33 Barras por ONP

Nº de Solução	Condição de falta			F.O	Tempo (seg.)	Existe Simetria?
	Tipo de falta	Ponto de falta	Zdefeito			
1	3ϕ	20-21 à 77,85%	0	0	9,60	Sim
2	3ϕ	24-25 à 50,77%	0	0,0014	8,11	Sim

Tabela 22 – Resultados do Teste 1- Rede de 33 Barras por VNS

Nº de Solução	Condição de falta			F.O	Tempo (seg.)	Existe Simetria?
	Tipo de falta	Ponto de falta	Zdefeito			
1	3 ϕ	20-21 à 77,83%	0	0	8,44	Sim
2	3 ϕ	24-25 à 50,82%	0	0,0014	5,91	Sim

Os resultados encontrados aplicando as duas técnicas foram semelhantes, estando o ponto real de falta dentro dos resultados encontrados como possíveis soluções para o problema. Devido à característica da rede de distribuição de possuir simetria, pode ocorrer de se encontrar mais de um ótimo para o problema, como visto nas Tabelas 21 e 22. Com estas informações, podem ser utilizadas informações dos dispositivos de proteção (atuação com abertura de trecho), para definir o trecho real de falta.

Os dois métodos foram eficientes para este caso, porém o custo computacional para a técnica VNS foi inferior, embora o número de iterações da técnica tenha sido maior que a ONP. Com isso fica perceptível que o custo computacional a cada iteração é menor para a técnica VNS. Uma possível explicação seria o fato da técnica ONP não ter sido implementada da melhor forma possível (otimizada).

A avaliação da função objetivo por geração pode ser visto nas Figuras 27 e 28 .

Figura 27 – Solução 1: a) ONP b) VNS

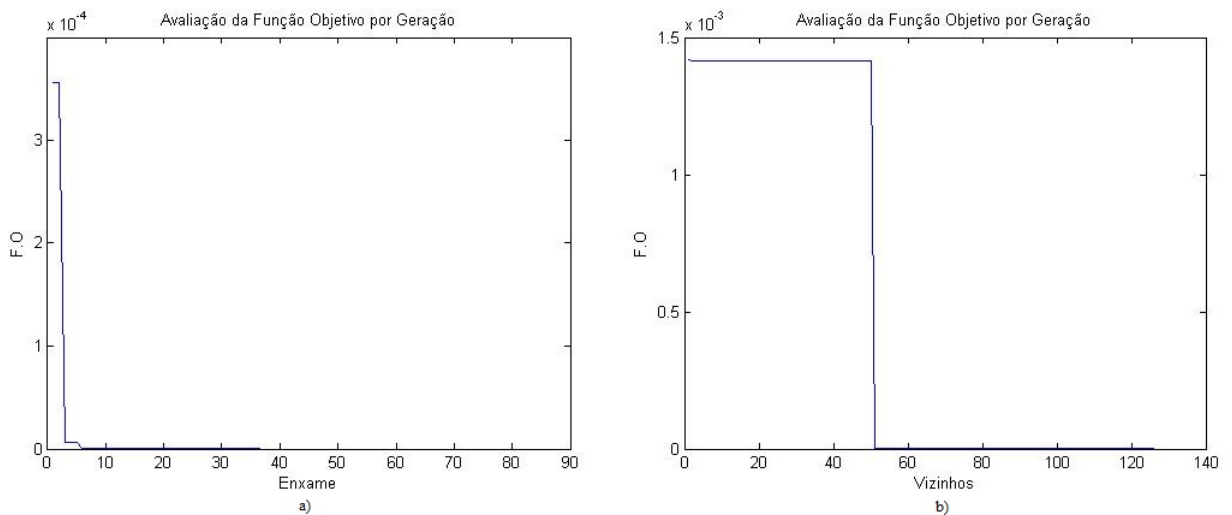
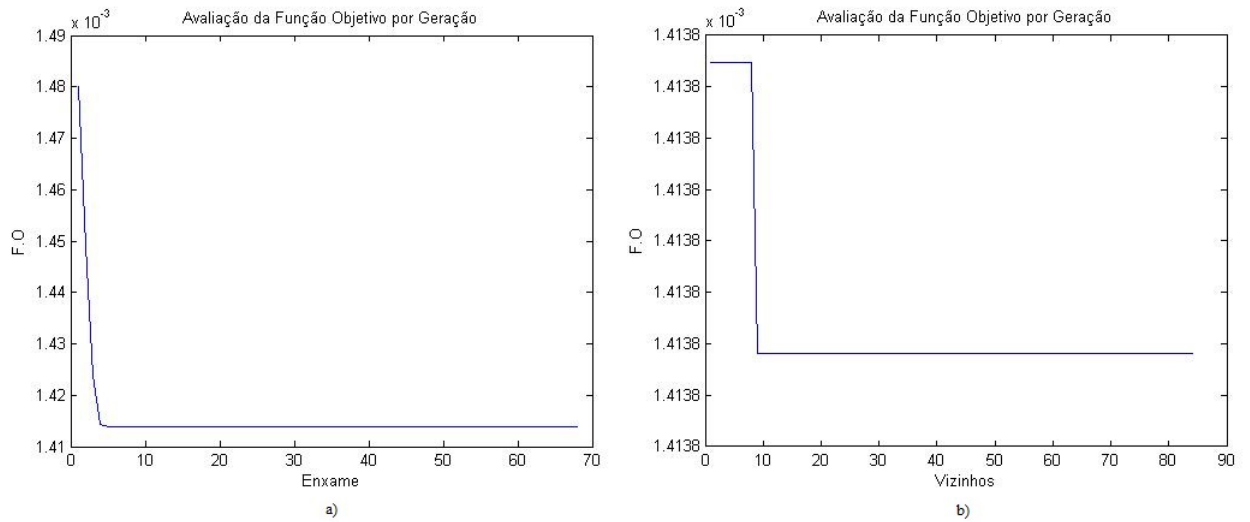


Figura 28 – Solução 2: a) ONP b) VNS



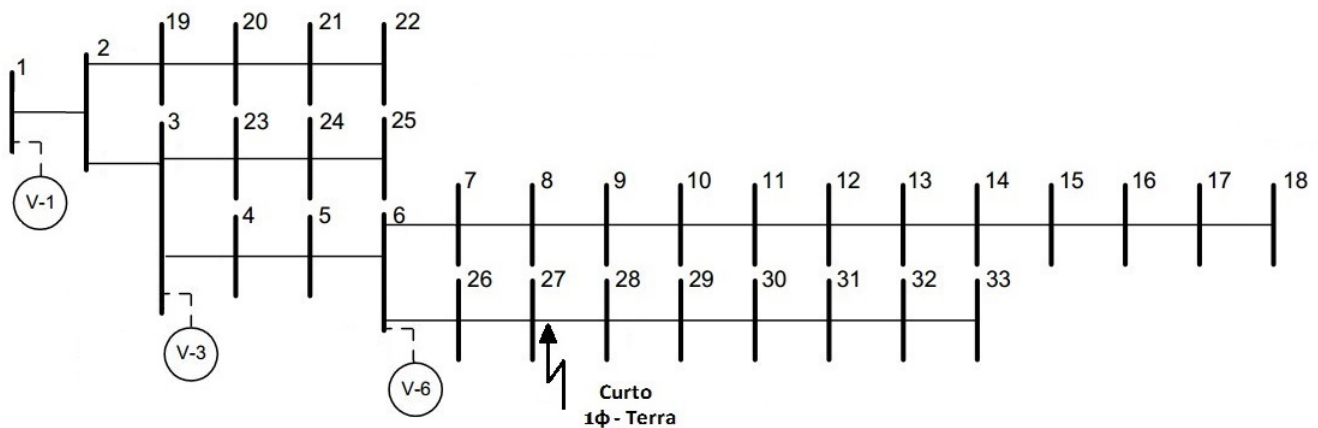
Teste 2

Tipo curto: 1ϕ -terra

Localização: 27-28 à 7,22%

Zdefeito: 10Ω

Figura 29 – Rede 33 barras.



Dados registrados pelos medidores: Tabela 23

Nos valores registrados pelos medidores, tabela 23, é possível perceber características típicas de tensão para o caso de faltas 1ϕ -terra. Um afundamento de tensão na fase de curto "a", conforme descrito no capítulo 3.

Tabela 23 – Informações Registradas pelos Medidores

Ponto de Medição	Parâmetro medido	Canais de Medição		
		Fase "a"	Fase "b"	Fase "c"
Barra 1	$ V (p.u)$	0.6190	0.9822	1.1219
Barra 3	$ V (p.u)$	0.4543	0.9860	1.1297
Barra 6	$ V (p.u)$	0.3756	0.9534	1.0966

O trecho de falta encontrados pelas técnicas ONP e VNS são apresentadas nas Tabelas 24 e 25 , respectivamente:

Tabela 24 – Resultados do Teste 2- Rede de 33 barras por ONP

Nº de Solução	Condição de falta			F.O	Tempo (seg.)	Existe Simetria?
	Tipo de falta	Ponto de falta	Zdefeito			
1	1ϕ -terra	27-28 à 7,22%	10	0	12,81	Sim
2	1ϕ -terra	6-7 à 54,13%	10,92	0	12,51	Sim

Tabela 25 – Resultados do Teste 2- Rede de 33 barras por VNS

Nº de Solução	Condição de falta			F.O	Tempo (seg.)	Existe Simetria?
	Tipo de falta	Ponto de falta	Zdefeito			
1	1ϕ -terra	27-28 à 8,48%	9,98	0	7,44	Sim
2	1ϕ -terra	6-7 à 54,06%	10,91	0	10,69	Sim

Como pode ser visto nas Tabelas 24 e 25 a técnica ONP apresentou mais precisão, porém teve um custo computacional maior.

A avaliação da função objetivo por geração pode ser visto nas Figuras 30 e 31.

Figura 30 – Solução 1: a) ONP b) VNS

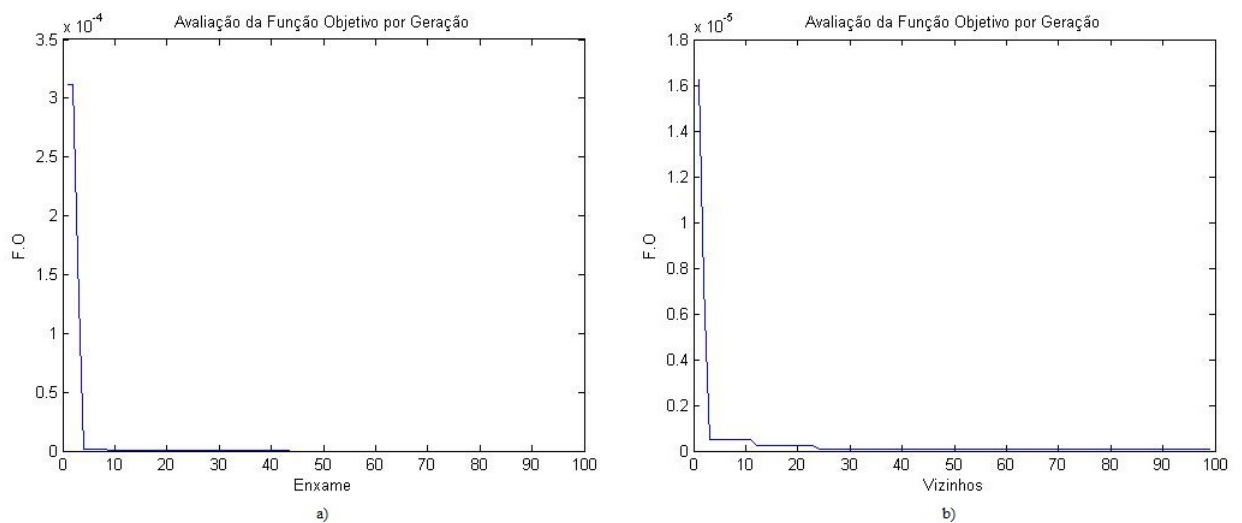
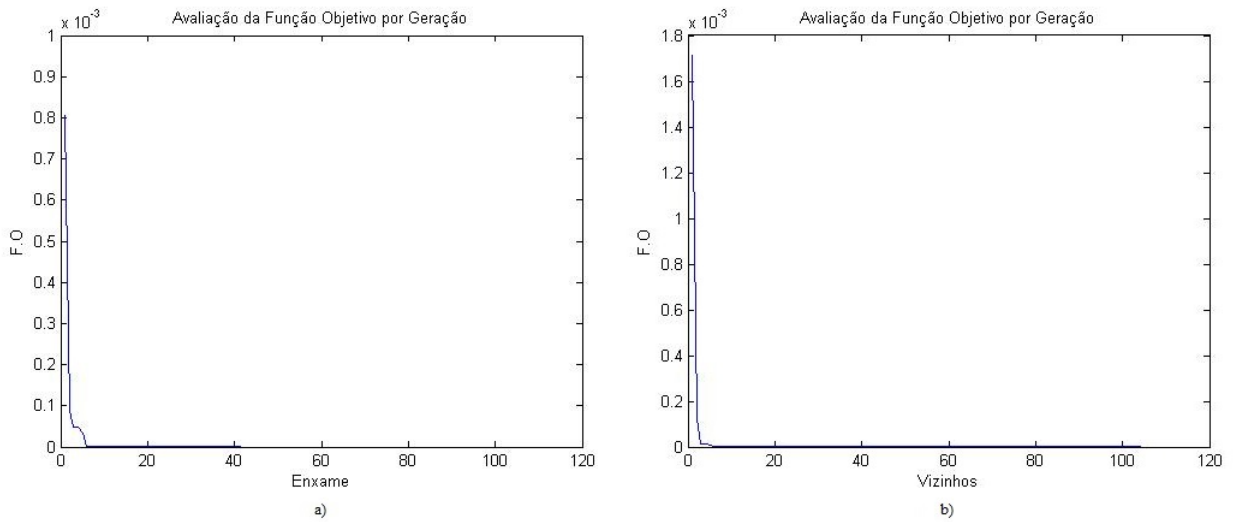


Figura 31 – Solução 2: a) ONP b) VNS



Para avaliar a eficiência das técnicas para as diversas possibilidades de curto (trecho e tipo), foram considerados de forma aleatória 50 curtos. Os resultados são apresentados nas Tabelas 26 e 27.

Tabela 26 – Análise do caso 33 barras - ONP

Simulação	Quantidade	Sucesso (%)
Não Simétrica	20	95
Simétrica	30	73

Tabela 27 – Análise do caso 33 barras - VNS

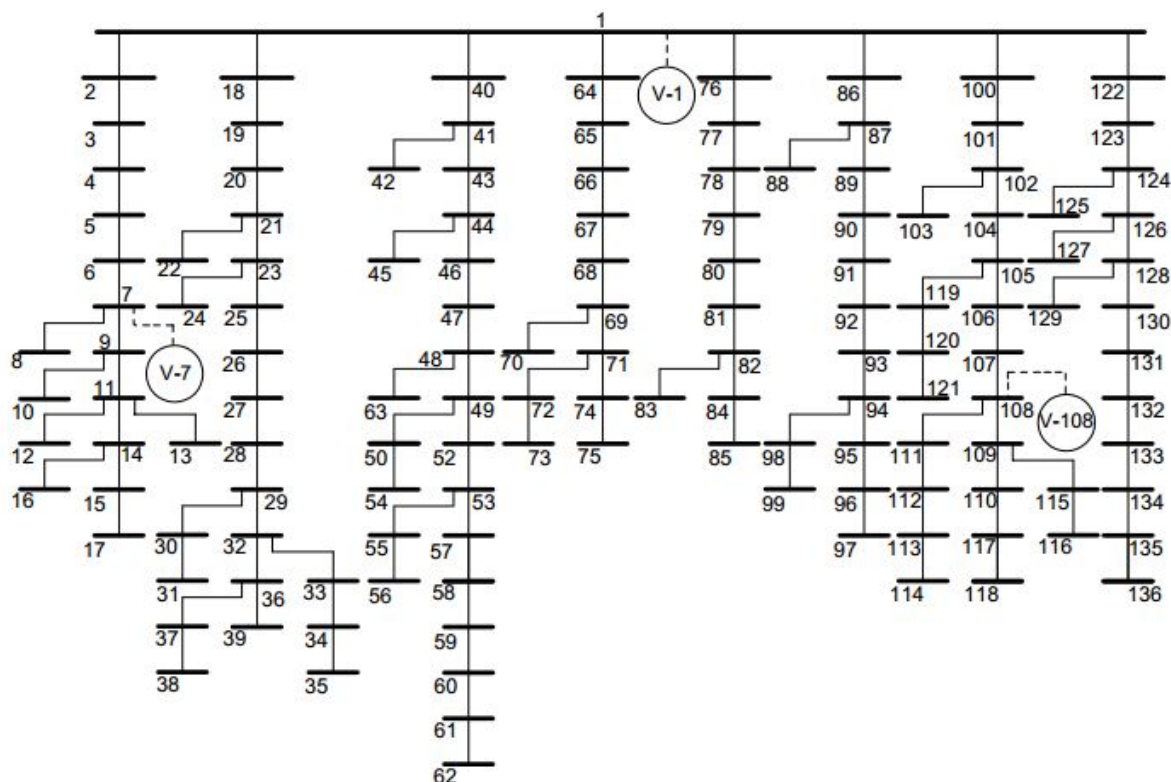
Simulação	Quantidade	Sucesso (%)
Não Simétrica	22	81
Simétrica	28	89

Conforme a Tabelas 26 e 27, no geral, a técnica VNS obteve sucesso em 86 % dos casos enquanto ONP obteve sucesso em 82%.

6.2 Rede de 136 Barras

Esta rede ilustrada na Figura 32 possui 136 barras, 135 trechos e opera com uma tensão de 13,8 kV. Foram consideradas duas condições de falta: uma crítica (trifásica) e outra mais leve (monofásica com impedância de defeito).

Figura 32 – Rede de 136 Barras



Teste 3

Tipo curto: Trifásico

Trecho: 104-105 à 80%

Zfalta: 0Ω

Dados registrados pelos medidores: Tabela 28

Tabela 28 – Informações Registradas pelos Medidores

Ponto de Medição	Parâmetro medido	Canais de Medição		
		Fase "a"	Fase "b"	Fase "c"
Barra 1	$ V (p.u)$	0.6405	0.6405	0.6405
Barra 7	$ V (p.u)$	0.6189	0.6189	0.6189
Barra 108	$ V (p.u)$	0.0039	0.0039	0.0039

Os trechos de falta localizados pelas técnicas são apresentados nas Tabelas 29 e 30.

Neste caso, as duas técnicas convergiram para a solução ótima e não houve simetria. Como pode ser visto nas Tabelas 29 e 30, a técnica ONP apresentou um custo computacional bem superior a técnica VNS, aproximadamente duas vezes maior.

A avaliação da função objetivo por geração por ser visto na Figura 33

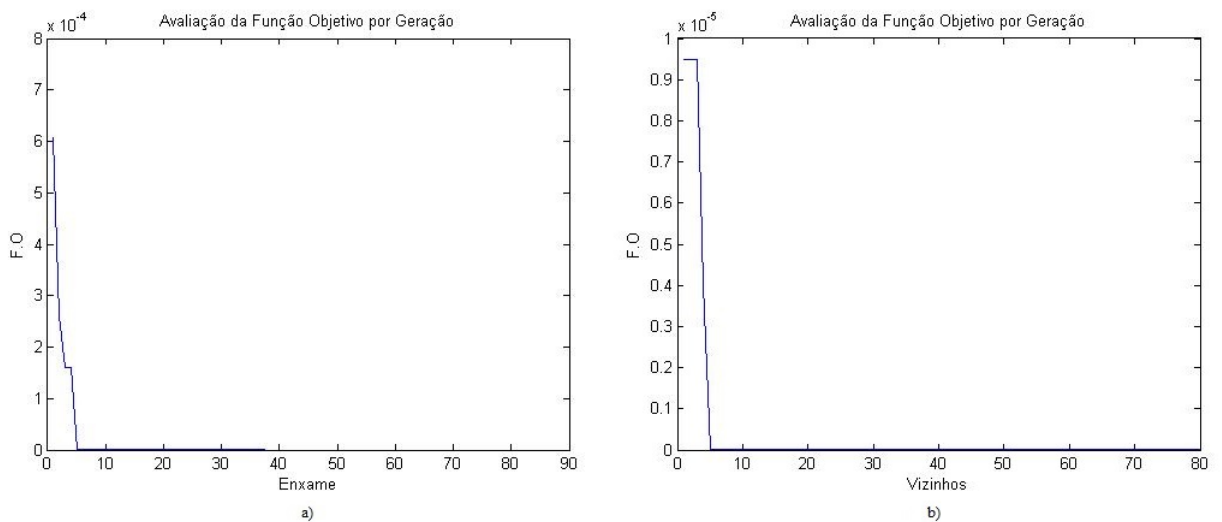
Tabela 29 – Resultados do Teste 3 - Rede de 136 Barras por ONP

Nº de Solução	Condição de falta			F.O	Tempo (seg.)	Existe Simetria?
	Tipo de falta	Ponto de falta	Zdefeito			
1	3 ϕ	104-105 à 87 %	0	0	37,07	Não

Tabela 30 – Resultados do Teste 3 - Rede de 136 Barras por VNS

Nº de Solução	Condição de falta			F.O	Tempo (seg.)	Existe Simetria?
	Tipo de falta	Ponto de falta	Zdefeito			
1	3 ϕ	104-105 à 87,05%	0	0	18,69	Não

Figura 33 – Solução 1: a) ONP b) VNS



Teste 4

Tipo curto: 1 ϕ -terra

Trecho: 81-82 à 45,18%

Zfalta:5

Dados registrados pelos medidores: Tabela 31

Tabela 31 – Informações Registradas pelos Medidores

Ponto de Medição	Parâmetro medido	Canais de Medição		
		Fase "a"	Fase "b"	Fase "c"
Barra 1	V (p.u)	0,2575	1,0651	1,10
Barra 7	V (p.u)	0,2453	1,0354	1,0797
Barra 108	V (p.u)	0,2353	1,0113	1,0619

Os trechos de falta localizados pelas técnicas são apresentados nas Tabelas 32 e 33.

Tabela 32 – Resultados do Teste 4 - Rede de 136 Barras por ONP

N ^o de Solução	Condição de falta			F.O	Tempo (seg.)	Existe Simetria?
	Tipo de falta	Ponto de falta	Zdefeito			
1	1 ϕ -terra	94-95 à 38,96%	5,53	0	80,57	Sim
2	1 ϕ -terra	81-82 à 17,44%	5,15	0	70,45	Sim

Tabela 33 – Resultados do Teste 4 - Rede de 136 Barras por VNS

N ^o de Solução	Condição de falta			F.O	Tempo (seg.)	Existe Simetria?
	Tipo de falta	Ponto de falta	Zdefeito			
1	1 ϕ -terra	94-95 à 42,59%	5,54	0	30,96	Sim
2	1 ϕ -terra	81-82 à 57,52%	4,94	0	75,83	Sim
3	1 ϕ -terra	134-135 à 76,10%	5,08	0	20,52	Sim

Os resultados apresentados pelas duas técnicas apresentaram uma divergência. A técnica VNS localizou uma possível solução para o problema no trecho 134-135. O valor da função objetivo para esta solução (134-135), indica que este trecho é simétrico aos demais, porém, não foi encontrado pela técnica ONP. Entretanto, o ponto real de falta está dentro das possíveis soluções para o problema para as duas técnicas, sendo assim, considera-se que as técnicas foram capazes de identificar o defeito.

Figura 34 – Solução 1 : a) ONP b) VNS

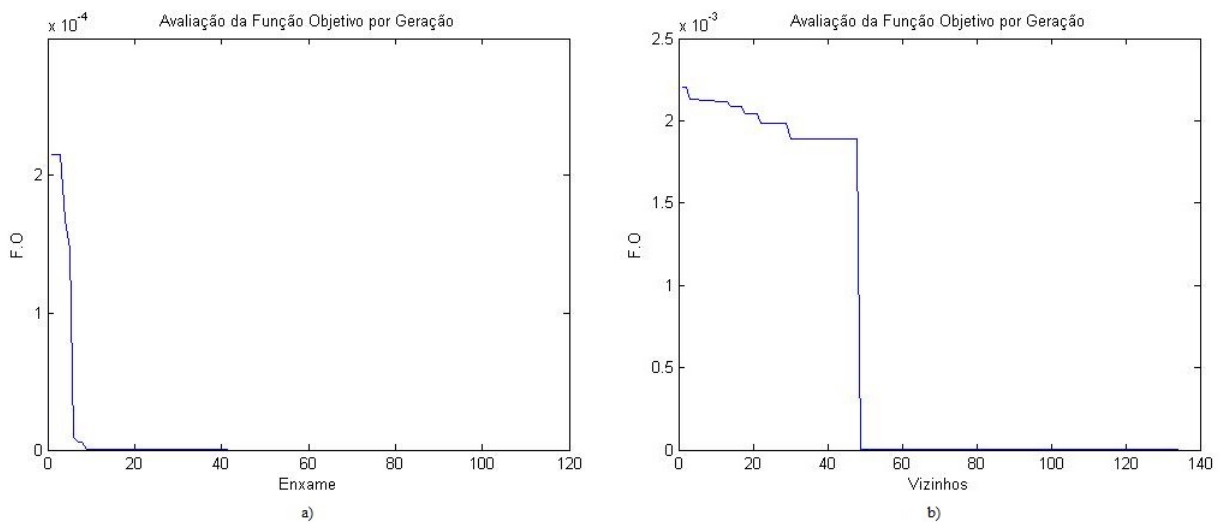
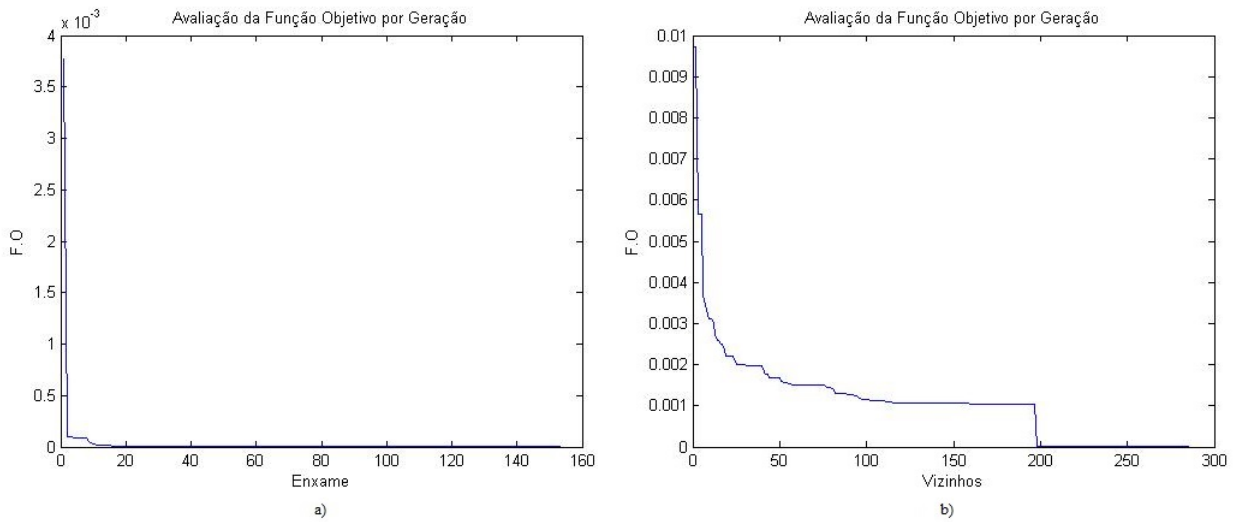


Figura 35 – Solução 2: a) ONP b) VNS



Para avaliar a eficiência das técnicas para as diversas possibilidades de curto (trecho e tipo) para a rede de 136 barras, foram considerados de forma aleatória 50 curtos. Os resultados são apresentados nas Tabelas 34 e 35.

Tabela 34 – Análise do caso 136 barras - ONP

Simulação	Quantidade	Sucesso (%)
Não Simétrica	13	85
Simétrica	37	68

Tabela 35 – Análise do caso 136 barras - VNS

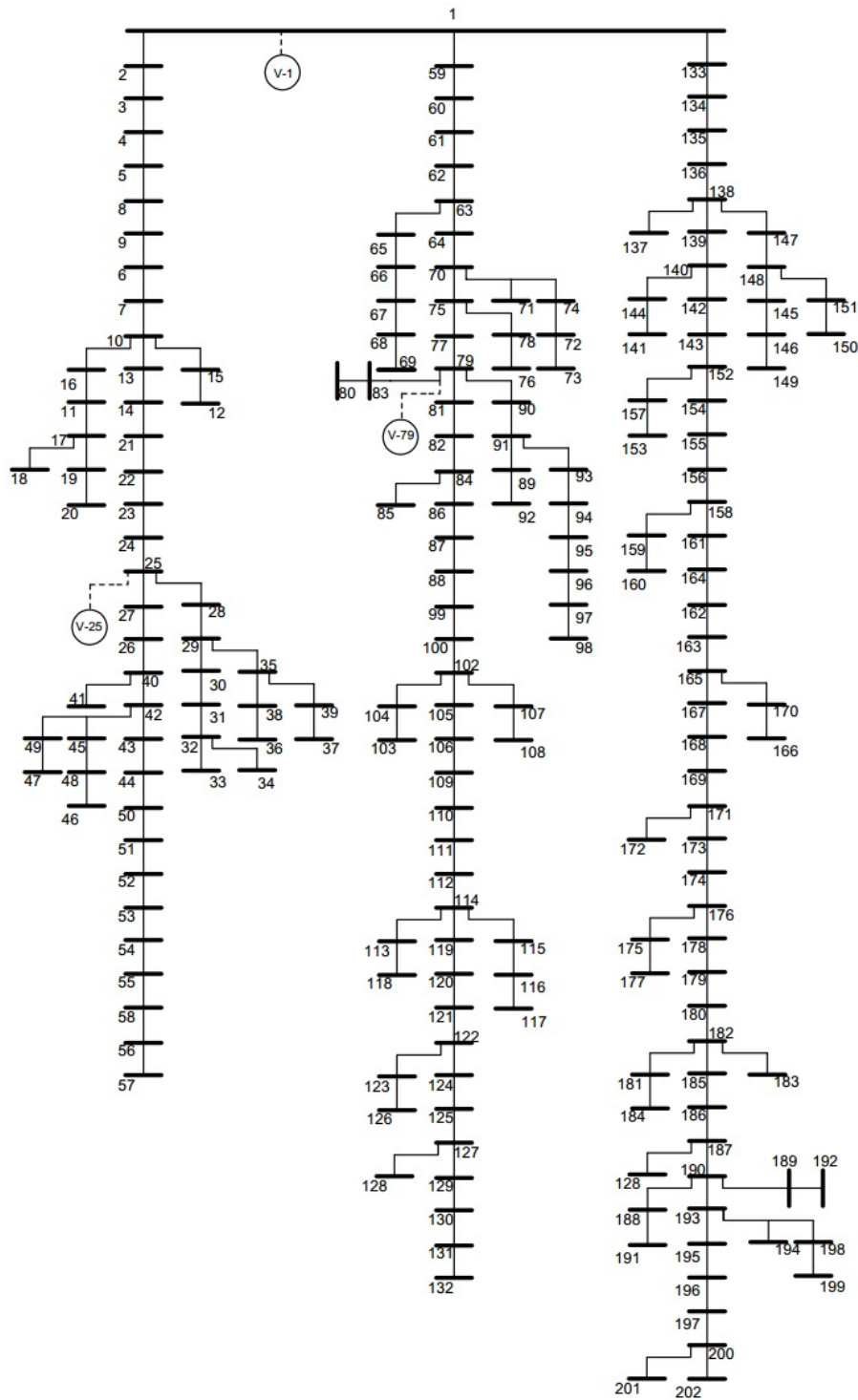
Simulação	Quantidade	Sucesso (%)
Não Simétrica	17	76
Simétrica	33	79

Para a rede de 136 barras, a técnica VNS apresentou novamente uma eficiência superior a técnica ONP. No total das 50 simulações a técnica ONP convergiu para 72 % enquanto a técnica VNS convergiu para 78 %.

6.3 Rede de 202 Barras

Esta rede possui 202 barras, 201 trechos e opera com uma tensão de 13,8 kV. Foram consideradas três condições de falta: uma falta entre as fases "b" e "c", uma crítica (3ϕ) e outra 1ϕ -terra. Foram considerados medidores nas barras 1, 25 e 79 conforme Figura 36.

Figura 36 – Rede de 202 Barras



Teste 5

Tipo curto: 2ϕ -terra

Trecho: 99-100 à 50,28%

Zfalta: 2Ω

Valores registrados pelos medidores: Tabela 36

Tabela 36 – Informações Registradas pelos Medidores

Ponto de Medição	Parâmetro medido	Canais de Medição		
		Fase "a"	Fase "b"	Fase "c"
Barra 1	$ V $ (p.u)	1,3089	0,4403	0,4425
Barra 25	$ V $ (p.u)	1,2780	0,4299	0,4071
Barra 79	$ V $ (p.u)	1,4668	0.1167	0.1144

Para o curto entre as fases "b" e "c" os valores de tensão registrados pelos medidores, Tabela 36, apresentaram as características esperadas. Percebe-se um afundamento de tensão entre as fases "b" e "c" e também uma elevação de tensão na fase "a".

Os resultados encontrados pelas técnicas são apresentados nas Tabelas 37 e 38.

Tabela 37 – Resultados do Teste 5 - Rede de 202 Barras por ONP

Nº de Solução	Condição de falta			F.O	Tempo (seg.)	Existe Simetria?
	Tipo de falta	Ponto de falta	Zdefeito			
1	2ϕ -terra	99-100 à 50,44%	2,0015	0	132,33	Não

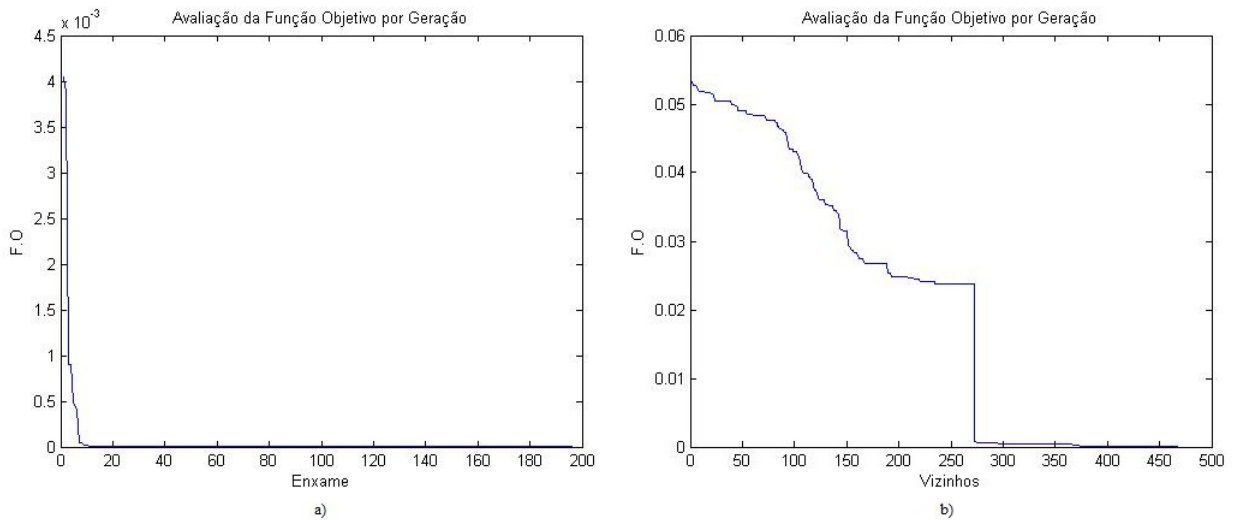
Tabela 38 – Resultados do Teste 5 - Rede de 202 Barras por VNS

Nº de Solução	Condição de falta			F.O	Tempo (seg.)	Existe Simetria?
	Tipo de falta	Ponto de falta	Zdefeito			
1	2ϕ -terra	99-100 à 53,44%	1,99	1,53e-6	189,11	Não

As técnicas encontraram a solução correta. Para esta condição não foram encontradas casos de simetrias. A técnica VNS foi um pouco menos precisa, variando aproximadamente 3 % do local verdadeiro de falta. A técnica ONP apresentou erro menor a 0,2 %.

A avaliação da função objetivo por geração por ser visto na Figura 37.

Figura 37 – Solução 1: a) ONP b) VNS



Teste 6

Tipo curto: 3ϕ

Trecho: 53-54 à 29,27%

Zfalta: 0Ω

Valores registrados pelos medidores: Tabela 39

Tabela 39 – Informações Registradas pelos Medidores

Ponto de Medição	Parâmetro medido	Canais de Medição		
		Fase "a"	Fase "b"	Fase "c"
Barra 1	$ V $ (p.u)	0,3824	0,3824	0,3824
Barra 25	$ V $ (p.u)	0.0968	0.0968	0.0968
Barra 79	$ V $ (p.u)	0.3488	0.3488	0.3488

Tabela 40 – Resultados do Teste 6 - Rede de 202 Barras por ONP

Nº de Solução	Condição de falta			F.O	Tempo (seg.)	Existe Simetria?
	Tipo de falta	Ponto de falta	Zdefeito			
1	3ϕ	53-54 à 29,27%	0	0	63,16	Não

Tabela 41 – Resultados do Teste 6 - Rede de 202 Barras por VNS

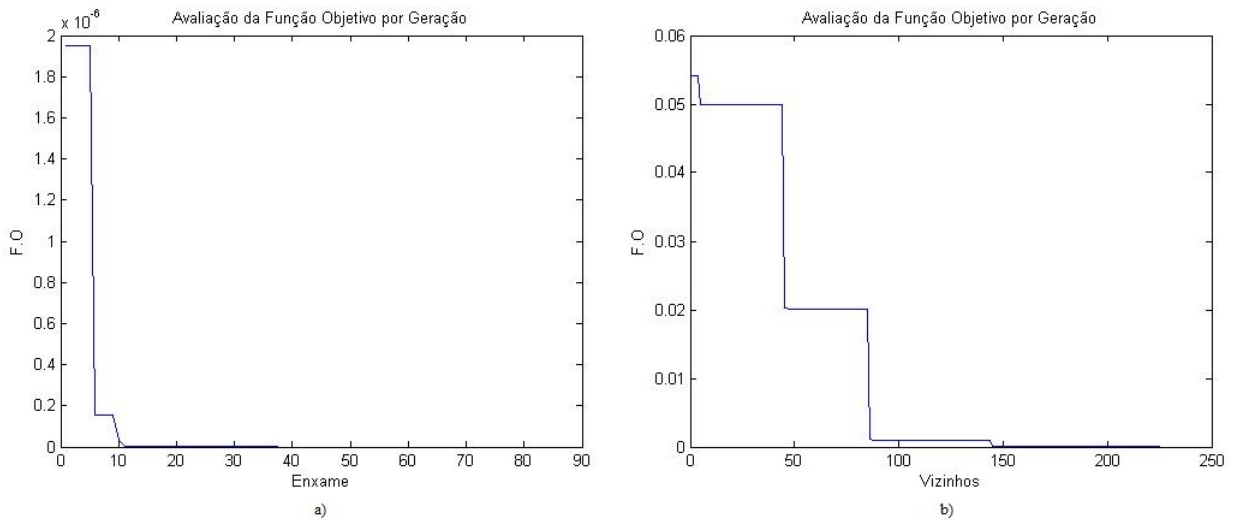
Nº de Solução	Condição de falta			F.O	Tempo (seg.)	Existe Simetria?
	Tipo de falta	Ponto de falta	Zdefeito			
1	3ϕ	53-54 à 29,90%	0	1,38e-8	27,59	Não

Como pode ser visto nas Tabelas 40 e 41, a técnica ONP foi mais precisa que a técnica VNS, porém o tempo computacional necessário foi mais de duas vezes maior. O

erro apresentado por VNS é consideravelmente pequeno, menos de 1%. Assim, considera-se que ambas as técnicas foram eficientes na localização do trecho sob falta.

A Figura 38 ilustra a avaliação da função objetivo a cada geração para cada uma das técnicas.

Figura 38 – Solução 1: a) ONP b) VNS



Teste 7

Tipo curto: 1ϕ -terra

Trecho: 147-148 à 37,12%

Zfalta: 12Ω

Valores registrados pelos medidores: Tabela 42

Tabela 42 – Informações Registradas pelos Medidores

Ponto de Medição	Parâmetro medido	Canais de Medição		
		Fase "a"	Fase "b"	Fase "c"
Barra 1	$ V $ (p.u)	0,9598	0,9670	1,0445
Barra 25	$ V $ (p.u)	0,9326	0,9344	1,0124
Barra 79	$ V $ (p.u)	0,9248	0,9254	1,0035

Neste caso, para o local de defeito e valor de impedância de falta, observou-se uma pequena variação de tensão na fase sob curto, "a".

Os trechos sob curto encontrados pelas técnicas são apresentados nas Tabelas 43 e 44.

Assim como nos outros casos, a técnica VNS teve um custo computacional menor que a Técnica VNS. Em contrapartida, a técnica ONP foi mais precisa. Novamente o erro

Tabela 43 – Resultados do Teste 7 - Rede de 202 Barras por ONP

N ^o de Solução	Condição de falta			F.O	Tempo (seg.)	Existe Simetria?
	Tipo de falta	Ponto de falta	Zdefeito			
1	1 ϕ -terra	138-139 à 44,51%	11,58	0	53,27	Sim
2	1 ϕ -terra	147-148 à 37,12%	12	0	62,25	Sim

Tabela 44 – Resultados do Teste 7 - Rede de 202 Barras por VNS

N ^o de Solução	Condição de falta			F.O	Tempo (seg.)	Existe Simetria?
	Tipo de falta	Ponto de falta	Zdefeito			
1	1 ϕ -terra	138-139 à 31,70%	9,2	1,06e-5	41,80	Sim
2	1 ϕ -terra	147-148 à 37,55%	15,65	6,2e-8	52,16	Sim

entre o ponto real sob falta e o localizado pela técnica VNS ficou abaixo de 1 %, podendo considerar uma solução precisa. A técnica ONP, localizou o ponto exato sob falta.

A avaliação da função objetivo para as soluções encontradas são apresentadas nas Figuras 39 e 40.

Figura 39 – Solução 1: a) ONP b) VNS

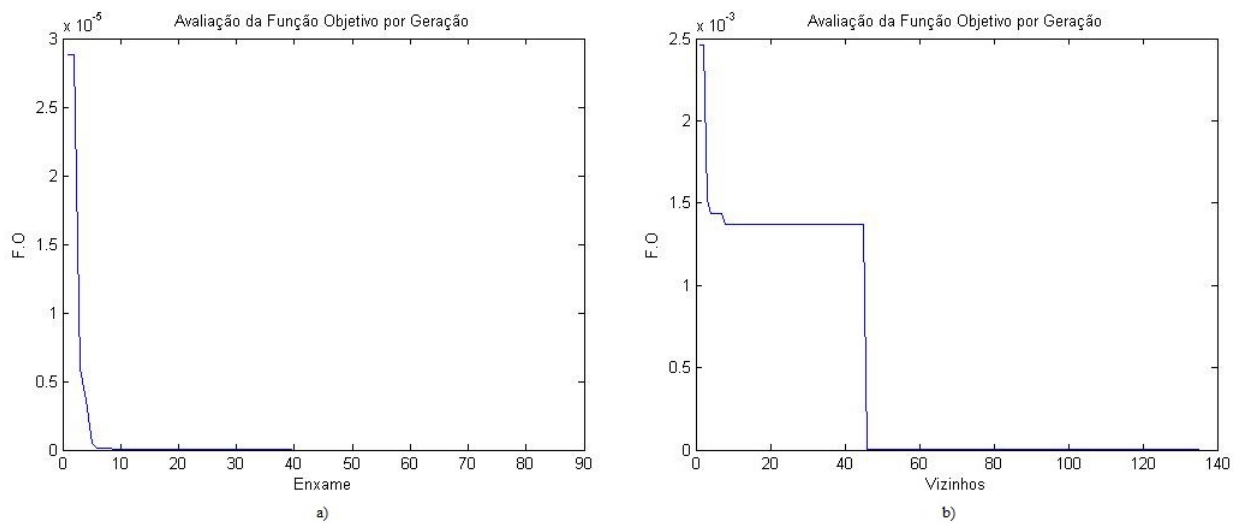
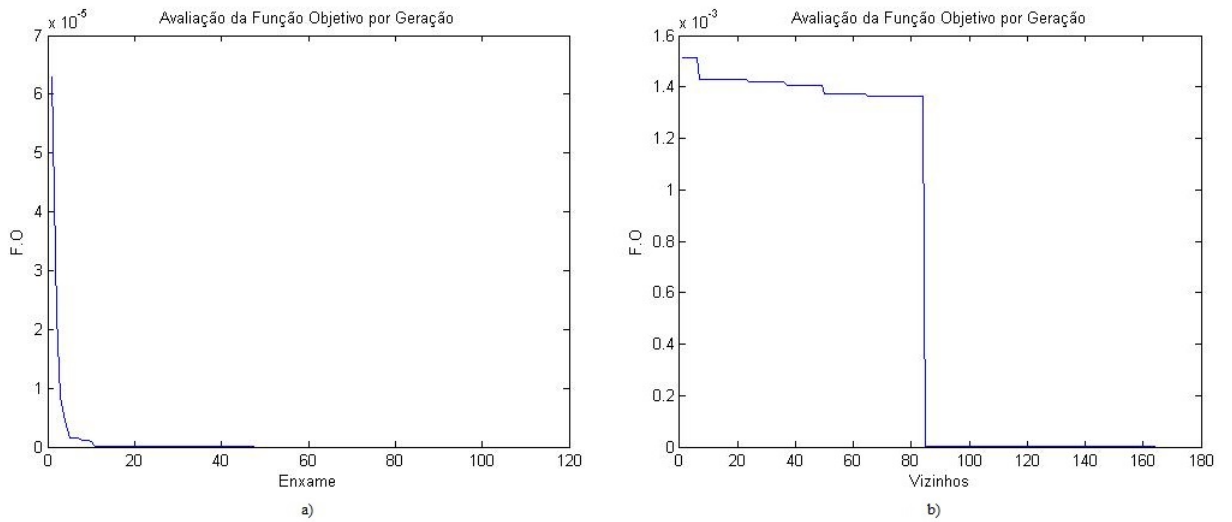


Figura 40 – Solução 2: a) ONP b) VNS



Para avaliar a eficiência das técnicas para as diversas possibilidades de curto (trecho e tipo) para a rede de 136 barras, foram considerados de forma aleatória 50 curtos. Os resultados são apresentados nas Tabelas 45 e 46.

Tabela 45 – Análise do caso 202 barras - ONP

Simulação	Quantidade	Sucesso (%)
Não Simétrica	30	50
Simétrica	20	60

Tabela 46 – Análise do caso 202 barras - VNS

Simulação	Quantidade	Sucesso (%)
Não Simétrica	29	69
Simétrica	21	81

7 Conclusões

As técnicas implementadas apresentaram-se aplicáveis à utilização para solução do problema de localização de faltas em linhas de distribuição, pois foram capazes de classificar e localizar todos os tipos de curto abordados neste trabalho.

As duas técnicas convergiram para a mesma resposta na maioria dos testes realizados, sendo a diferença no tempo computacional necessário para chegar a esta resposta notório entre as técnicas.

A técnica VNS apresentou custo computacional menor em sua maioria, ou seja, o tempo para convergir a uma resposta dita ótima foi menor que na técnica ONP. Em alguns casos, chegou a apresentar um tempo para solução mais de duas vezes menor que a ONP (testes 3 e 6). Algumas explicações para tais tempos pode ser na própria implementação da técnica (ONP), de não ter sido realizada da melhor forma possível, ou como pode ser visto em alguns casos, tendo a ONP respostas mais precisas, pode ter como consequência um maior custo.

A técnica ONP por sua vez, apresentou uma melhor eficiência que a técnica VNS, isso pode ser visto nos testes 5,6 e 7. Uma possível explicação, poderia ser no fato da técnica ONP ter como princípio uma busca orientada, onde as partículas tendem a mesma posição, e neste deslocamento passar pela solução ótima. Diferente, a técnica VNS faz um busca aleatória ao redor da solução corrente.

Pode-se observar que à medida que foram avaliadas redes com número maior de nós, a eficiência das técnicas diminuiu. Isto era esperado, visto que as informações obtidas das redes (tensões medidas) permaneceram sendo de apenas três medidores, então, com o aumento da complexidade, ou seja, com o aumento das derivações e trechos, existem mais soluções possíveis, mais ótimos locais e globais como soluções.

A princípio era esperado uma eficiência acima de 90 % , mas as técnicas conseguiram encontrar, no pior caso (rede de 202 barras) uma eficiência de pouco mais de 54% para ONP, e 74 % para VNS entre todos os testes realizados. Sabe-se que quanto mais informações disponíveis existem, mais fácil é a identificação do ponto exato de defeito. Para uma possível melhora dos resultados, acrescentar medições de corrente e aumentar o número de medidores dispersos na rede, seria uma solução.

Embora a eficiência não esteja dentro do esperado, os resultados mostram a viabilidade para aprofundamento das pesquisas com ambas as técnicas para solução do problema em questão.

7.1 Sugestões de Trabalhos Futuros

- Aplicar outras técnicas de otimização (Simulated Annealing e Redes Neurais);
- Avaliar técnicas implementadas para o método de 1 terminal (medição apenas da subestação);
- Acrescentar medidas de correntes para avaliar melhora na eficiência da localização.

Referências

ABB. *Produtos e Serviços*. 2016. Acesso em: 20 de outubro 2016. Disponível em: <<http://www.abb.com.br/ProductGuide/>>.

ABRADEE, A. B. de Distribuidores de E. E. *Redes de Energia Elétrica*. 2015. Acesso em: 11 de junho 2015. Disponível em: <<http://www.abradee.com.br/setor-eletrico/redes-de-energia-eletrica>>.

BRANDINI, P. A. F. *Metaheurística Particle Swarm Utilizada para Alocação Ótima de Bancos de Capacitores em Sistemas de Distribuição Radial*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, março 2007.

COSER, J. *Contribuições aos Métodos para Localização de Faltas em Alimentadores de Distribuição*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Fevereiro 2006.

COURY, D. et al. Proteção digital dos sistemas elétricos de potência: dos relés eletromecânicos aos microprocessador inteligentes. In: SIMPOSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS. Goiânia, 2012. p. 283.

CRISMEG. *Produtos*. 2016. Acesso em: 20 de outubro 2016. Disponível em: <<http://www.crismeg.com.br/produtos.php>>.

DIVYA, K.; SRINIVASAN, S. Optimal siting and sizing of dg in radial distribution system and identifying fault location in distribution system integrated with distributed generation. In: . [S.l.]: IEE, 2016.

FILOMENA, A. D. *Localização de Defeitos em Alimentadores Primários Subterrâneos: Formulação Estendida Baseada na Impedância Aparente*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, julho 2008.

KAGAN, N. *Introdução aos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica*. 1. ed. [S.l.]: Edgard Blucher, 2010. 328 p.

KAGAN, N.; ROBBA, J. E.; SCHMIDT, P. H. *Estimação de Indicadores de Qualidade de energia*. 2. ed. [S.l.]: Edgard Blucher, 2009. 230 p.

Particle swarm optimization. [S.l.]: IEE, 1995. 1942-1948 p.

KINDERMANN, G. *Curto-Circuito*. 2. ed. Porto Alegre: Sagra Luzzatto, 1997. 214 p.

MARTINS, R. da S. *Apresentação do Sistema de Medição Sincronizada e Abordagem de sua Implantação no estimador de estado*. 2012. UFRJ. Trabalho de Conclusão de Curso.

MLADENOVIC, N.; HANSEN, P. Variable neighborhood search. computers and operations research. *Oxford*, v. 11, n. 24, p. 1097–1100, 1997.

MODOLON, A. B. *Sistema de Detecção e Localização de Faltas em Sistemas de Distribuição*. 2013. Faculdade SATC. Trabalho de Conclusão de Curso.

- MORETO, M. *Localização de Falhas de Alta Impedância em Sistemas de Distribuição de Energia: Uma Metodologia Baseada em Redes Neurais Artificiais*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Abril 2012.
- NAVARO luís F. *Redes Neurais Artificiais Aplicadas à Detecção, Classificação e Localização de Falhas em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica*. 2014. USP. Trabalho de Conclusão de Curso.
- OLIVEIRA, M. C. S.; SILVA, T. L.; ALOISE, D. J. Otimização por nuvem de partículas: Diferença entre aplicações a problemas contínuos e discretos. In: UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE. [S.l.], 2004. p. 9. Simpósio Brasileiro de Pesquisas Operacionais.
- PAPIA, R.; MISHRA, D. P.; PANDA, D. debasmita. Hybrid technique for fault location of a distribution line. In: . [S.l.]: IEE, 2015.
- PEREIRA, R. A. F. *Localização de Falhas em Alimentadores de Distribuição de Energia Elétrica Usando Medições Esparsas de Tensões*. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual Paulista, Março 2007.
- PIOLI, D. *Proteção de Redes de Distribuição Primária*. [S.l.], 2004. ND-3.001.
- REIS, J. V. A. dos. *Meta-Heurística Baseada em Busca em Vizinhança Variável Aplicadas a Problemas de Operação de Transportes*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, Novembro 2013.
- SADEH, J.; BAKHSHIZADEH, E.; KAZEMZADEH, R. A new fault location algorithm for radial distribution systems using modal analysis. *Electrical Power and Energy Systems*, p. 271–278, October 2012.
- SANTO, S. G. D.; PEREIRA, C. E. de M.; ZANETTA, L. C. Localização de falhas em linhas de transmissão com múltiplas derivações utilizando dados de somente dois terminais. *Revista Controle e Automação*, v. 22, n. 2, p. 156, Abril 2011.
- SCHNEIDER. *Rele de Proteção MT - Disjuntor MT*. 2016. Acesso em: 20 de outubro 2016. Disponível em: <https://www.schneider-electric.com.br/documents/support/lista-de-precos/Cap_13.pdf>.
- STEVENSON, W. D. J. *Elementos de Análise de Sistemas de Potência*. 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986. 458 p.
- STRINGFIELD, T. W.; MARIHART, D. J.; STEVENS, R. F. *Fault Location Methods for Overhead Lines*. [S.l.], 1957. v. 76, 518-529 p.
- TAKAGI, T. et al. A new algorithm of an accurate fault location for ehv/uhv transmission lines: Part 2 - laplace transfer method. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-101, n. 3, p. 564–573, August 1982a.

ANEXO A - Dados das Redes de Distribuição

Para todas as redes, a subestação é a barra 1.

Tabela 47 – Rede de 33 barras

Barras	P (kW)	Q (kVAr)	Linhas			
			Envio	Receptora	R (Ω)	X (Ω)
1	0	0				
2	100	60	1	2	0,0922	0,047
3	90	40	2	3	0,493	0,2511
4	120	80	3	4	0,366	0,1864
5	60	30	4	5	0,3811	0,1941
6	60	20	5	6	0,819	0,707
7	200	100	6	7	0,1872	0,6188
8	200	100	7	8	0,7114	0,2351
9	60	20	8	9	1,03	0,74
10	60	20	9	10	1,044	0,74
11	45	30	10	11	0,1966	0,065
12	60	35	11	12	0,3744	0,1238
13	60	35	12	13	1,468	1,155
14	120	80	13	14	0,5416	0,7129
15	60	10	14	15	0,591	0,526
16	60	20	15	16	0,7463	0,5454
17	60	20	16	17	1,289	1,721
18	90	40	17	18	0,732	0,574
19	90	40	2	19	0,164	0,1565
20	90	40	19	20	1,5042	1,3554
21	90	40	20	21	0,4095	0,4784
22	90	40	21	22	0,7089	0,9373
23	90	50	3	23	0,4512	0,3083
24	420	200	23	24	0,898	0,7091
25	420	200	24	25	0,896	0,7011
26	60	25	6	26	0,203	0,1034
27	60	25	26	27	0,2842	0,1447
28	60	20	27	28	1,059	0,9337
29	120	70	28	29	0,8042	0,7006
30	200	600	29	30	0,5075	0,2585
31	150	70	30	31	0,9744	0,963
32	210	100	31	32	0,3105	0,3619
33	60	40	32	33	0,341	0,5302

Tabela 48 – Rede de 136 barras

Barras	P (kW)	Q (kVAr)	Linhas			
			Envio	Receptora	R (Ω)	X (Ω)
1	0	0				
2	0	0	1	2	0,33205	0,76653
3	47,78	19,009	2	3	0,00188	0,00433
4	42,551	16,929	3	4	0,22340	0,51535
5	87,022	34,622	4	5	0,09943	0,22953
6	311,31	123,855	5	6	0,15571	0,35945
7	148,869	59,228	6	7	0,16321	0,37677
8	238,672	94,956	7	8	0,11444	0,26417
9	62,299	24,786	7	9	0,05675	0,05666
10	124,598	49,571	9	10	0,52124	0,27418
11	140,175	55,768	9	11	0,10877	0,10860
12	116,813	46,474	11	12	0,39803	0,20937
13	249,203	99,145	11	13	0,91744	0,31469
14	291,447	115,592	11	14	0,11823	0,11805
15	303,72	120,835	14	15	0,50228	0,26421
16	215,396	85,695	14	16	0,05675	0,05666
17	198,586	79,007	16	17	0,29379	0,15454
18	0	0	1	18	0,33205	0,76653
19	0	0	18	19	0,00188	0,00433
20	0	0	19	20	0,22324	0,51535
21	30,127	14,729	20	21	0,10881	0,25118
22	230,972	112,920	21	22	0,71078	0,37388
23	60,256	29,459	21	23	0,18197	0,42008
24	230,972	112,920	23	24	0,30326	0,15952
25	120,507	58,915	23	25	0,02439	0,05630
26	0	0	25	26	0,04502	0,10394
27	56,981	27,857	26	27	0,01876	0,04331
28	364,665	178,281	27	28	0,11823	0,11230
29	0	0	28	29	0,02365	0,02361
30	124,647	60,939	29	30	0,18954	0,09970
31	56,981	27,857	30	31	0,39803	0,20937
32	0	0	29	32	0,05675	0,05666
33	85,473	41,787	32	33	0,09477	0,04985
34	0	0	33	34	0,41699	0,21934
35	396,735	193,960	34	35	0,11372	0,05982
36	0	0	32	36	0,07566	0,07555
37	181,152	88,563	36	37	0,36960	0,19442
38	242,172	242,172	37	38	0,26536	0,13958
39	75,316	36,821	36	39	0,05675	0,05660

Tabela 49 – Continuação da Rede de 136 barras

Barras	P (6W)	Q (6VAr)		Linhas		
40	0	0	Envio	Receptora	R (Ω)	X (Ω)
41	1,254	0,531	1	40	0,33205	0,76653
42	6,274	2,660	40	41	0,11819	0,27283
43	0	0	41	42	2,96288	1,01628
44	117,880	49,971	41	43	0,00188	0,00433
45	62,668	25,566	43	44	0,06941	0,16024
46	172,285	73,034	44	45	0,81502	0,42872
47	458,556	194,388	44	46	0,06378	0,14724
48	262,962	111,473	46	47	0,13132	0,30315
49	235,761	99,942	47	48	0,06191	0,14291
50	0	0	48	49	0,11444	0,26417
51	109,215	46,298	49	50	0,28374	0,28331
52	0	0	50	51	0,28374	0,28321
53	72,809	30,865	49	52	0,04502	0,10394
54	258,473	109,570	52	53	0,02626	0,06063
55	69,168	29,322	53	54	0,06003	0,13858
56	21,843	9,260	54	55	0,03002	0,06929
57	0	0	55	56	0,02064	0,04764
58	20,527	8,702	53	57	0,10881	0,25118
59	150,548	63,819	57	58	0,25588	0,13460
60	220,687	93,552	58	59	0,41699	0,21934
61	92,384	39,163	59	60	0,50228	0,26421
62	0	0	60	61	0,33170	0,17448
63	226,693	96,098	61	62	0,20849	0,10967
64	0	0	48	63	0,13882	0,32047
65	294,016	116,974	1	64	0,00750	0,01732
66	83,015	33,028	64	65	0,27014	0,62362
67	83,015	33,028	65	66	0,38270	0,88346
68	103,77	41,285	66	67	0,33018	0,76220
69	176,408	70,184	67	68	0,32830	0,75787
70	83,015	33,028	68	69	0,17072	0,39409
71	217,917	86,698	69	70	0,55914	0,29412
72	23,294	9,267	69	71	0,05816	0,13425
73	5,075	2,019	71	72	0,70130	0,36890
74	72,638	28,899	72	73	1,02352	0,53839
75	405,99	161,523	71	74	0,06754	0,15591
76	0	0	74	75	1,32352	0,45397
77	100,182	42,468	1	76	0,01126	0,02598
78	142,523	60,417	76	77	0,72976	1,68464

Tabela 50 – Continuação da Rede de 136 barras

Barras	P (kW)	Q (kVAr)	Linhas			
79	96,042	40,713	Envio	Receptora	R (Ω)	X (Ω)
80	300,454	127,366	77	78	0,22512	0,51968
81	141,238	59,873	78	79	0,20824	0,48071
82	279,847	118,631	79	80	0,04690	0,10827
83	87,312	37,013	80	81	0,61950	0,61857
84	243,849	103,371	81	82	0,34049	0,33998
85	247,750	105,025	82	83	0,56862	0,29911
86	0	0	82	84	0,10877	0,10860
87	89,878	38,878	84	85	0,56862	0,29911
88	1137,280	482,108	1	86	0,01126	0,02598
89	458,339	194,296	86	87	0,41835	0,96575
90	385,197	163,290	87	88	0,10499	0,13641
91	0	0	87	89	0,43898	1,01338
92	79,608	33,747	89	90	0,07520	0,02579
93	87,312	37,013	90	91	0,07692	0,17756
94	0	0	91	92	0,33205	0,76653
95	74,001	31,370	92	93	0,08442	0,19488
96	232,050	98,369	93	94	0,13320	0,30748
97	141,819	60,119	94	95	0,29320	0,29276
98	0	0	95	96	0,21753	0,21721
99	76,449	32,408	96	97	0,26482	0,26443
100	0	0	94	98	0,10318	0,23819
101	51,322	21,756	98	99	0,13507	0,31181
102	59,874	25,874	1	100	0,00938	0,02165
103	9,065	3,843	100	101	0,16884	0,38976
104	2,092	0,887	101	102	0,11819	0,27283
105	16,735	7,094	102	103	2,28608	0,78414
106	1506,522	638,634	102	104	0,45587	1,05236
107	313,023	132,694	104	105	0,69600	1,60669
108	79,831	33,842	105	106	0,45774	1,05669
109	51,322	21,756	106	107	0,20298	0,26373
110	0	0	107	108	0,21348	0,27737
111	202,435	85,815	108	109	0,54967	0,28914
112	60,823	25,874	109	110	0,54019	0,28415
113	45,618	19,338	108	111	0,04550	0,05911
114	0	0	111	112	0,47385	0,24926
115	157,070	157,070	112	113	0,86241	0,45364
116	0	0	113	114	0,56862	0,29911
117	250,148	106,041	109	115	0,77711	0,40878

Tabela 51 – Continuação Rede de 136 barras

Barras	P (kW)	Q (kVAr)	Linhas			
			Receptora	Envio	R (Ω)	X (Ω)
118	0	0	115	116	1,08038	0,56830
119	68.809	28.593	110	117	1,06633	0,57827
120	32.072	13.596	117	118	0,47385	0,24926
121	61.084	25.894	105	119	0,32267	0,74488
122	0	0	119	120	0,14633	0,33779
123	94.622	46.600	120	121	0,12382	0,28583
124	49.858	24.375	1	122	0,01126	0,02598
125	123.164	60.214	122	123	0,64910	1,49842
126	78.350	38.304	123	124	0,04502	0,10394
127	145.475	71.121	124	125	0,52640	0,18056
128	21.369	10.447	124	126	0,02064	0,04764
129	74.789	36.564	126	127	0,53071	0,27917
130	227.926	111.431	126	128	0,09755	0,22520
131	35.614	17.411	128	129	0,11819	0,27283
132	249.295	121.877	128	130	0,13882	0,32047
133	316.722	154.842	130	131	0,04315	0,09961
134	333.817	163.199	131	132	0,09192	0,21220
135	249.295	121.877	132	133	0,16134	0,37244
136	0	0	133	134	0,37832	0,37775
			134	135	0,39724	0,39664
			135	136	0,29320	0,29276

Tabela 52 – Rede de 202 barras

Barras	P (kW)	Q (kVAr)	Linhas			
1	0	0	Envio	Receptora	R (Ω)	X (Ω)
2	0	0	2	3	0,01883000	0,04232000
3	38,25	23,70	3	4	0,06590500	0,14812000
4	0	0	4	5	0,03766000	0,08464000
5	63,75	39,50	6	7	0,01694700	0,03808800
6	38,25	23,70	7	10	0,01883000	0,04232000
7	95,20	58,99	17	18	0,07472800	0,03912000
8	0	0	17	19	0,18682000	0,09780000
9	0	0	19	20	0,07472800	0,03912000
10	63,75	39,50	21	22	0,04142600	0,09310400
11	63,75	39,50	23	24	0,00659000	0,01481200
12	510	316,02	24	25	0,00659000	0,01481200
13	0	0	29	30	0,04670500	0,02445000
14	0	0	30	31	0,04670500	0,02445000
15	0	0	31	32	0,04670500	0,02445000
16	0	0	32	33	0,05941600	0,02026000
17	127,5	79,01	32	34	0,08912400	0,03039000
18	63,75	39,50	29	35	0,09341000	0,04890000
19	63,75	39,50	40	41	0,03713500	0,01266250
20	255	158,01	26	40	0,00941500	0,02116000
21	0	0	40	41	0,00941500	0,02116000
22	0	0	42	45	0,05941600	0,02026000
23	255	158,01	42	43	0,00941500	0,02116000
24	255	158,01	43	44	0,00941500	0,02116000
25	382,5	237,02	44	50	0,01412200	0,03174000
26	191,25	118,51	50	51	0,01318100	0,02962400
27	0	0	51	52	0,01129800	0,02539200
28	0	0	52	53	0,01129800	0,02539200
29	51,00	31,60	53	54	0,01129800	0,02539200
30	95,63	59,25	54	55	0,01129800	0,02539200
31	95,63	59,25	5	8	0,01883000	0,04232000
32	0	0	9	6	0,01883000	0,04232000
33	350,63	217,26	10	13	0,01883000	0,04232000
34	350,63	217,26	14	21	0,03766000	0,08464000
35	0	0	27	26	0,02447900	0,05501600
36	95,63	59,25	15	12	0,05935000	0,04654000
37	63,75	39,50	11	17	0,09341000	0,04890000
38	0	0	16	11	0,04670500	0,02445000
39	0	0	28	29	0,06538700	0,03423000
40	0	0	38	36	0,03736400	0,01956000
41	255,00	158,01	39	37	0,03736400	0,01956000
42	0	0	48	46	0,03713500	0,01266250
43	191,25	118,51	49	47	0,03713500	0,01266250
44	95,63	59,25	55	58	0,07427000	0,02532500
45	0	0	56	57	0,10397800	0,03545500
46	605,63	375,27	59	60	0,01597000	0,04095000

Tabela 53 – Rede de 202 barras

Barras	P (kW)	Q (kVAr)	Linhas			
47	63,75	39,50	Envio	Receptora	R (Ω)	X (Ω)
48	0	0	62	63	0,04152200	0,10647000
49	0	0	63	65	0,01916400	0,04914000
50	573,75	355,52	70	71	0,11140500	0,03798750
51	191,25	118,52	72	73	0,08169700	0,02785750
52	255,00	158,01	70	75	0,02071300	0,04655200
53	765,00	474,03	75	77	0,01129800	0,02539200
54	255,00	158,01	77	79	0,00753200	0,01692800
55	0	0	93	94	0,05604600	0,02792400
56	318,75	197,51	94	95	0,02802300	0,01396200
57	318,75	197,51	95	96	0,02802300	0,01396200
58	0	0	96	97	0,02802300	0,01396200
59	0	0	97	98	0,05137500	0,02559700
60	25,50	15,80	79	81	0,00941500	0,02116000
61	0	0	84	85	0,01318100	0,02962400
62	0	0	84	86	0,00470700	0,01058000
63	0	0	86	87	0,00564900	0,01269600
64	0	0	87	88	0,00941500	0,02116000
65	95,63	59,25	88	89	0,02071300	0,04655200
66	0	0	100	102	0,00564900	0,01269600
67	38,25	23,70	100	101	0,01412200	0,03174000
68	0	0	102	107	0,00659000	0,01481200
69	102,00	63,20	107	108	0,01035600	0,02327600
70	0	0	102	105	0,00470700	0,01058000
71	89,25	55,30	105	106	0,00564900	0,01269600
72	0	0	106	109	0,01129800	0,02539200
73	38,25	23,70	110	111	0,00753200	0,01692800
74	0	0	111	112	0,00753200	0,01692800
75	0	0	112	114	0,00753200	0,01692800
76	510,00	316,02	114	115	0,00564900	0,01269600
77	595,00	595,00	115	116	0,00753200	0,01692800
78	0	0	116	117	0,00941500	0,02116000
79	0	0	114	119	0,00753200	0,01692800
80	350,63	217,26	119	120	0,00753200	0,01692800
81	382,50	237,02	120	121	0,00659000	0,01481200
82	0	0	121	122	0,00564900	0,01269600
83	0	0	124	125	0,01506400	0,03385600
84	0	0	125	127	0,00941500	0,02116000
85	38,25	23,70	127	128	0,00941500	0,02116000
86	255,00	158,01	129	130	0,01318100	0,02962400
87	446,25	276,52	130	131	0,01318100	0,02962400
88	382,50	237,02	60	61	0,09901400	0,25389000
89	0	0	64	70	0,01883000	0,04232000
90	0	0	81	82	0,01129800	0,02539200
91	0	0	123	126	0,06538700	0,03003000
92	95,63	59,25	66	67	0,01597000	0,04095000

Tabela 54 – Continuação da Rede de 202 barras

Barras	P (kW)	Q (kVAr)	Linhas			
			Envio	Receptora	R (Ω)	X (Ω)
93	191,25	118,51	68	69	0,13368600	0,04558500
94	216,75	134,31	74	72	0,13368600	0,04558500
95	95,63	59,25	78	76	0,16339400	0,05571500
96	191,25	118,51	83	80	0,12625900	0,04305250
97	63,75	39,50	90	91	0,17824800	0,06078000
98	382,50	237,02	104	103	0,07427000	0,02532500
99	0	0	113	118	0,05198900	0,01772700
100	0	0	131	132	0,01694700	0,03808800
101	63,75	39,50	135	136	0,01506400	0,03385600
102	0	0	136	138	0,06025600	0,13542400
103	63,75	9,50	139	140	0,02071300	0,04655200
104	0	0	140	142	0,00941500	0,02116000
105	127,50	79,01	142	143	0,00564900	0,01269600
106	95,63	59,25	143	152	0,00564900	0,01269600
107	106,25	65,84	152	154	0,00564900	0,01269600
108	127,50	79,01	154	155	0,00564900	0,01269600
109	95,63	59,25	155	156	0,00564900	0,01269600
110	0	0	156	158	0,00564900	0,01269600
111	127,50	79,01	158	159	0,02802300	0,01467000
112	127,50	79,01	159	160	0,04670500	0,02445000
113	0	0	158	161	0,00941500	0,02116000
114	0	0	163	165	0,01883000	0,04232000
115	318,75	197,51	165	167	0,00564900	0,01269600
116	350,63	217,26	167	168	0,00564900	0,01269600
117	446,25	276,52	168	169	0,00753200	0,01692800
118	63,75	39,50	171	172	0,07122000	0,05584800
119	127,50	79,01	171	173	0,00941500	0,02116000
120	63,75	39,50	173	174	0,00941500	0,02116000
121	382,50	237,02	174	176	0,00941500	0,02116000
122	0	0	176	178	0,00376600	0,00846400
123	76,50	47,40	178	179	0,00376600	0,00846400
124	255,00	158,01	179	180	0,00564900	0,01269600
125	191,25	118,51	182	183	0,04670500	0,02445000
126	255,00	158,01	182	185	0,00564900	0,01269600
127	233,75	144,84	185	186	0,00564900	0,01269600
128	573,75	355,52	186	187	0,00564900	0,01269600
129	276,25	171,18	187	190	0,00564900	0,01269600
130	155,00	158,01	190	193	0,02259600	0,05078400
131	393,13	243,60	193	194	0,06538700	0,03423000
132	510,00	316,02	193	195	0,04670500	0,02445000
133	0	0	195	196	0,04670500	0,02445000
134	0	0	196	197	0,04670500	0,02445000
135	0	0	197	200	0,04670500	0,02445000
136	0	0	200	201	0,11209200	0,05868000
137	0	0	200	202	0,09341000	0,04890000
138	0	0	200			

Tabela 55 – Continuação da Rede de 202 barras

Barras	P (kW)	Q (kVAr)	Linhas			
			Envio	Receptora	R (Ω)	X (Ω)
139	63,75	39,50	193	198	0,00941500	0,02116000
140	0	0	198	193	0,00941500	0,02116000
141	63,75	39,50	138	137	0,00941500	0,02116000
142	38,25	23,70	133	134	0,06967100	0,15658400
143	38,25	23,70	161	164	0,01129800	0,02539200
144	0	0	147	148	0,07472800	0,03912000
146	0	0	148	145	0,05604600	0,02934000
147	0	0	151	150	0,04670500	0,02445000
148	63,75	39,50	144	141	0,02802300	0,01467000
149	95,63	59,25	157	153	0,03736400	0,01956000
150	63,75	39,50	170	166	0,06538700	0,03423000
151	0	0	175	177	0,07472800	0,03912000
152	0	0	181	184	0,06071650	0,03178500
153	63,75	39,50	189	192	0,05044750	0,03955900
154	63,75	39,50	146	149	0,03736400	0,01956000
155	212,50	131,68	1	2	0,01883000	0,04232000
156	63,75	39,50	1	133	0,06590500	0,14812000
157	0	0	134	135	0,03766000	0,08464000
158	0	0	138	147	0,01694700	0,03808800
159	63,75	39,50	145	146	0,01883000	0,04232000
160	38,25	23,70	148	151	0,07472800	0,03912000
161	63,75	39,50	138	139	0,18682000	0,09780000
162	0	0	140	144	0,07472800	0,03912000
163	95,63	59,25	152	157	0,04142600	0,09310400
164	0	0	164	162	0,00659000	0,01481200
165	0	0	162	163	0,00659000	0,01481200
166	605,63	375,27	165	170	0,04670500	0,02445000
167	446,25	276,52	169	171	0,04670500	0,02445000
168	191,25	118,51	176	175	0,04670500	0,02445000
169	255,00	158,01	180	182	0,05941600	0,02026000
170	0	0	182	181	0,08912400	0,03039000
171	63,75	39,50	190	188	0,09341000	0,04890000
172	127,50	79,01	190	189	0,03713500	0,01266250
173	63,75	39,50	8	9	0,00941500	0,02116000
174	191,68	118,77	10	16	0,00941500	0,02116000
175	0	0	10	15	0,05941600	0,02026000
176	0	0	13	14	0,00941500	0,02116000
177	208,25	129,04	22	23	0,00941500	0,02116000
178	191,68	118,77	25	28	0,01412200	0,03174000
179	127,50	79,01	35	38	0,01318100	0,02962400
180	127,50	79,01	35	39	0,01129800	0,02539200
181	0	0	25	27	0,01129800	0,02539200
182	0	0	45	48	0,01129800	0,02539200
183	255,00	158,01	45	49	0,01129800	0,02539200
184	127,50	79,01	58	56	0,01883000	0,04232000
185	56,981	27,857				

Tabela 56 – Continuação da Rede de 202 barras

Barras	P (kW)	Q (kVAr)	Linhas			
			Envio	Receptora	R (Ω)	X (Ω)
186	127,50	79,01	1	59	0,05935000	0,04654000
187	510,00	316,02	61	62	0,09341000	0,04890000
188	0	0	65	66	0,04670500	0,02445000
189	0	0	67	68	0,06538700	0,03423000
190	0	0	63	64	0,03736400	0,01956000
191	127,50	79,01	70	74	0,03736400	0,01956000
192	448,38	277,83	75	78	0,03713500	0,01266250
193	255,00	158,01	79	83	0,03713500	0,01266250
194	510,00	316,02	79	90	0,07427000	0,02532500
195	382,50	237,02	91	89	0,10397800	0,03545500
196	255,00	158,01	91	93	0,01597000	0,04095000
197	191,25	118,51	99	100	0,04152200	0,10647000
198	446,25	276,52	102	104	0,01916400	0,04914000
199	133,88	82,96	109	110	0,11140500	0,03798750
200	95,63	59,25	114	113	0,08169700	0,02785750
201	382,50	237,02	122	123	0,02071300	0,04655200
202	1030,20	638,36	122	124	0,01129800	0,02539200
			82	84	0,00753200	0,01692800