



**Universidade Federal de Ouro Preto**  
**Instituto de Ciências Exatas Aplicadas – ICEA**  
**Departamento de Engenharia Elétrica – DEELT**



**Trabalho de Conclusão de Curso**

**Localização de Falhas em Sistemas de Distribuição de Energia  
Elétrica**

**Pedro Henrique Santos Silva**

**João Monlevade, MG**

**2022**

**Pedro Henrique Santos Silva**

**Localização de Falhas em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica**

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

**Universidade Federal de Ouro Preto**

**João Monlevade, MG**

**2022**



## FOLHA DE APROVAÇÃO

**Pedro Henrique Santos Silva**

### Localização de Faltas em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Elétricista

Aprovada em 23 de junho de 2022

#### Membros da banca

Dr. Wilington Guerra Zvietcovich - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)  
Dr. Juan Carlos Galvis Manso (Universidade Federal de Ouro Preto)  
Dr. Francisco Ricardo Abrantes Couy Baracho (Universidade Federal de Ouro Preto)

Wilington Guerra Zvietcovich, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 23/09/2022



Documento assinado eletronicamente por **Wilington Guerra Zvietcovich, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 25/09/2022, às 23:57, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [http://sei.ufop.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0403182** e o código CRC **0F96BF3A**.

## **Agradecimentos**

Agradeço primeiramente à Deus por conceder-me sabedoria, saúde e forças para superar as dificuldades.

A Universidade Federal de Ouro Preto e todo seu corpo docente que me forneceram a base de conhecimento necessária para me auxiliar neste trabalho.

Ao meu orientador e professor Wilingthon Guerra Zvietcovich, pelo suporte e por compartilhar todo o seu conhecimento e experiência.

A minha família pelo amor e apoio incondicional.

*"Só se pode alcançar um grande êxito  
quando nos mantemos fiéis a nós  
mesmos."*

*– Friedrich Nietzsche*

## Resumo

Este trabalho aborda o problema de localização de faltas em sistemas de distribuição de energia elétrica o qual foi amplamente tratado na literatura. O estudo apresentado tem como objetivo encontrar o local no instante da ocorrência de uma falta elétrica, a qual deixa sem serviço de energia elétrica a um grupo de consumidores, isso devido à atuação dos dispositivos de proteção. A solução deste problema reduz o tempo sem serviço deste grupo de consumidores afetados e melhora indicadores de qualidade de energia elétrica.

Na literatura, o problema é modelado dentro da programação linear inteira mista, e solucionado por técnicas de otimização não exatas pela natureza combinatória do problema. Neste trabalho o problema é solucionado utilizando a técnica híbrida Greedy Randomized Adaptive Search Procedure – GRASP e o Variable Neighborhood Search – VNS. Ambas metaheurísticas têm sido frequentemente utilizadas para resolução de problemas de otimização em diferentes áreas de conhecimento.

Para avaliar as técnicas foram utilizadas duas redes de distribuição, sendo uma de 33 e outra de 70 barras. Dos resultados depreendem-se a eficiência para encontrar os locais procurados.

**Palavras-Chave:** Sistemas de distribuição, Localização de faltas, GRASP, VNS.

## **Abstract**

This work addresses the problem of locating faults in electric power distribution systems, which has been widely treated in the literature. The study presented aims to locate the place at the moment of the occurrence of a fault that leaves without service a part of consumers, because the protective equipment operates. Solving this problem reduces the serviceless time of the group of affected consumers by improving electricity quality indicators.

In the literature, the problem is modeled within the entire mixed linear programming, and solved by optimization techniques not exact by the combinatorial nature of the problem. In this work the problem is solved using the hybrid technique Greedy Randomy Adaptive Search Procedure - GRASP and Variable Neighborhood Search - VNS. Both metaheuristics have been frequently used to solve optimization problems in different areas of knowledge.

To evaluate the techniques, two distribution networks were used, one of 33 and another of 70 bars and the results are obtained the efficiency to find the sites sought.

**Keywords:** Distribution Systems, location of fault, optimization by Clonal Selection, GRASP, VNS.

**LISTA DE ABREVIATURAS**

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BFS	Backward-Forward Sweep
SEP	Sistema Elétrico de Potência
QEE	Qualidade de Energia Elétrica
TF	Transformada de Fourier
TW	Transformada Wavelet
TS	Transformada S
NA	Normalmente Aberta
NF	Normalmente Fechada
SE	Subestação Elétrica
GRASP	Greedy Randomized Adaptive Search Procedure
VNS	Variable Neighborhood Search
SDEE	Sistema de Distribuição de Energia Elétrica



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Diagrama Unifilar de um Sistema Elétrico de Potência considerando 3 usinas geradoras. .	15
Figura 2: Poste de concreto contendo linhas de média e baixa tensão .....	16
Figura 3: Chave fusível. ....	18
Figura 4: Religador Automático.....	19
Figura 5: Seccionalizador automático. ....	20
Figura 6: Disjuntor com relé de proteção de sobrecorrente para aplicação em instalações industriais. .....	20
Figura 7: Esquemático de um Transformador Real com uma carga acoplada ao lado secundário.....	21
Figura 8: Circuito equivalente do transformador com impedância referida ao secundário.....	22
Figura 9: Modelagem de uma linha de distribuição - modelo de linha curta. ....	23
Figura 10: Sistema de distribuição primária com topologia radial. ....	27
Figura 11: Representação trifásica do trecho de uma linha de distribuição para análise de fluxo de potência. ....	27
Figura 12: Fluxograma do método BFS de fluxo de potência.....	30
Figura 13: Representação de uma falta de energia elétrica, levando em consideração o seu tipo, o local e a impedância de falta.....	32
Figura 14: Circuito equivalente de para análise de um curto-circuito trifásico no sistema de distribuição. ....	33
Figura 15: Modelo equivalente em paralelo para o curto-circuito bifásico em um sistema radial. ....	34
Figura 16: Modelo em série para o curto-circuito monofásico em um sistema radial.....	35
Figura 17: Modelo curto-circuito bifásico assimétrico. ....	36
Figura 18: Fluxograma para análise de curto-circuito de um SEP. ....	37
Figura 19: Rede para análise de interrupção.....	38
Figura 20: Método da Distância Euclidiana.....	40
Figura 21: Fluxograma do algoritmo da Busca Local.....	44
Figura 22: Rede de 33 barras. ....	51
Figura 23: Evolução do processo de busca local - VNS - para obtenção do ponto de ocorrência do curto circuito. ....	53
Figura 24: Rede de 70 barras. ....	55
Figura 25: Trajetória evolutiva da Busca Local.....	57

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Frequências típicas de ocorrências de curtos – circuitos. ....	31
Tabela 2: Representação de uma solução para o problema de localização de falta. ....	44
Tabela 3: Condição de falta ocorrida na rede elétrica. ....	45
Tabela 4: Tensão no instante da falta coletada pelos medidores alocados na rede. ....	46
Tabela 5: Passo 1 da fase construtiva do GRASP. ....	46
Tabela 6: Classificação dos tipos de curto-circuito. ....	47
Tabela 7: Passo 1 da fase construtiva do GRASP. ....	47
Tabela 8: Solução $x'$ da Etapa de Agitação do VNS. ....	48
Tabela 9: Solução $x''$ - Etapa de Busca local do VNS. ....	48
Tabela 10: Valores de tensão nas barras onde estão os medidores – gerados pela solução $x''$ . ....	49
Tabela 11: Dados das Redes Elétricas. ....	50
Tabela 12: Parâmetros próprios da metodologia. ....	50
Tabela 13: Parâmetros do curto-circuito para preenchimento dos medidores. ....	51
Tabela 14: 10 melhores resultados obtidos pelo método GRASP. ....	51
Tabela 15: 10 melhores resultados obtidos pelo método VNS para Busca Local. ....	52
Tabela 16: Cenário de teste 2. ....	53
Tabela 17: Cenário de teste 3. ....	53
Tabela 18: Resultados do teste 2 - Rede de 33 Barras. ....	54
Tabela 19: Resultados do teste 3 - Rede de 33 Barras. ....	54
Tabela 20: Vetor de parâmetros do curto-circuito. ....	55
Tabela 21: 5 melhores soluções obtidas pelo método construtivo - GRASP. ....	56
Tabela 22: Resultados obtidos pelo método de busca local - VNS. ....	56
Tabela 23: Cenário de teste 5. ....	57
Tabela 24: Cenário de teste 6. ....	57
Tabela 25: Resultados do teste 5 - Rede de 70 Barras. ....	57
Tabela 26: Resultados do teste 6 - Rede de 70 Barras. ....	58

## Sumário

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	10
1.1.	Motivação.....	11
1.2	Revisão Bibliográfica .....	11
1.3	Objetivos.....	13
1.4	Organização do Trabalho.....	14
<b>2.</b>	<b>O SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA</b> .....	15
2.1	Sistemas de Distribuição .....	16
2.2	Proteção de Sistemas de Distribuição .....	17
2.2.1	Chave Fusível e Elo fusível.....	17
2.2.2	Religadores Automáticos.....	18
2.2.3	Seccionadores Automáticos.....	19
2.2.4	Relés de sobrecorrente.....	20
2.3	Modelagem dos Componentes de uma Rede de Distribuição para Análise de Fluxo de Potência .....	21
2.3.1	Modelo do Transformador .....	21
2.3.2	Modelo da Linha.....	22
2.3.4	Modelo de Cargas .....	23
	Cargas com Potência Constante .....	24
	Cargas com Corrente Constante .....	24
	Cargas com Impedância Constante .....	24
	Cargas Constituídas pela Composição dos Modelos Anteriores .....	25
<b>3.</b>	<b>FLUXO DE POTÊNCIA E CURTO CIRCUITO</b> .....	26
3.1	Fluxo de Potência .....	26
3.2	Análise de curto-circuito.....	30
3.3	Tipos de Curto Circuito .....	32
3.3.1	Curto-Circuito Trifásico.....	32
3.3.2	Curto-Circuito Bifásico no sistema Radial.....	33
3.3.3	Curto-Circuito Monofásico.....	35
3.3.4.	Curto-Circuito Bifásico Assimétrico .....	36

4.	PROBLEMA DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS .....	38
4.1	Modelo matemático do problema de localização de faltas .....	39
5.	MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO PARA SOLUCIONAR O PROBLEMA DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS .....	41
5.1	Greedy Randomized Adaptative Search Procedure – GRASP .....	41
5.2	Variable Neighborhood Search – VNS .....	43
5.3	Implementação do GRASP – VNS no problema de localização de faltas .....	44
5.3.1	Primeira etapa – Método Construtivo .....	46
5.3.2	Segunda etapa – Busca Local .....	48
6.	RESULTADOS.....	50
6.1	REDE DE 33 BARRAS.....	51
6.2.	Rede de 70 barras .....	54
7.	CONCLUSÃO .....	59
8.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	60
7.	ANEXOS .....	64
7.1.	ANEXO A – REDE DE 33 BARRAS .....	64
7.2.	ANEXO B – REDE DE 70 BARRAS .....	66

## 1. INTRODUÇÃO

A mudança no setor elétrico brasileiro devido principalmente à privatização de grande parte das empresas distribuidoras de energia elétrica e à criação da Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, gerou a necessidade pela busca por uma melhor Qualidade de Energia Elétrica – QEE visando estas empresas a adaptar-se às normas, as quais são cada vez mais exigentes. Para isso, tornou-se necessário o desenvolvimento de hardwares e softwares visando, além de melhorar a QEE, auxiliar na operação e no planejamento dos sistemas de energia elétrica e observando o retorno de investimentos. (PEREIRA,2007)

Segundo as normas atuais (PRODIST, Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica), o fornecimento de energia elétrica deve ser avaliado perante a três fatores, sendo eles a Qualidade do Produto, a Qualidade do Serviço e a Qualidade do Atendimento ao consumidor. O primeiro relaciona a conformidade da tensão em regime permanente e à ausência de perturbações na sua forma de onda, que ocorrem devido a diversos fatores, como por exemplo a ligação de cargas e assimetria de redes elétricas. O segundo, que é o foco deste trabalho, entende-se como a continuidade do fornecimento de energia elétrica ao consumidor, que podem ser afetadas por interrupções programadas (manutenções) ou interrupções não programadas (faltas de energia elétrica). Estas últimas são aleatórias e imperecíveis, criando a necessidade de reestabelecer o serviço da maneira mais rápida possível. Por fim, o terceiro representa a forma com que os clientes são tratados perante a um imprevisto que os afetem diretamente. (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2010).

A resolução da ANEEL 024/2000 estabelece os indicadores correspondentes à qualidade de serviço, sendo eles:

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 de interrupção individual por unidade consumidora.

As faltas não programadas, que são o foco deste trabalho, ocorrem em pontos aleatórios dos SDEE e são provocadas por diversas causas, por exemplo, pelo

rompimento de cabos, pelo contato de árvores ou animais com as linhas, pelos problemas de funcionamento com os equipamentos que fazem parte de determinados trechos da linha, pelos fenômenos naturais, dentre outros (KINDERMANN, 1997). Estas faltas como já mencionado ocasionam a interrupção de energia elétrica em um grupo de consumidores, os quais comunicam às empresas distribuidoras via telefonemas sobre o problema, que por sua vez, já possuem os procedimentos para o reestabelecimento de energia (BÍSCARO, 2009).

Técnicas de localização de faltas têm sido propostas na literatura e implementada por empresas distribuidoras para reduzir o tempo de localização do local de ocorrência da falta elétrica e, algumas delas são brevemente apresentadas ainda neste capítulo. Contudo, existem na literatura técnicas de otimização ainda não aplicadas neste problema, gerando o desafio, aplicar elas visando uma maior precisão para encontrar os locais de falta (PEREIRA, 2007).

### **1.1. Motivação**

Tendo em vista o grande número de ocorrências de faltas nos SDEE e seus grandes prejuízos para os consumidores, surgiu o interesse em aplicar alguns dos conhecimentos obtidos no decorrer da graduação de forma aprofundada, como a análise de fluxo de potência, curto circuito e métodos de otimização para resolução de problemas de localização de faltas.

### **1.2 Revisão Bibliográfica**

Em (CHEN; HUANG; HE, 2015) é proposto um método em que, a partir dos sinais de tensão e corrente em diferentes pontos da rede elétrica auxilia para detectar, classificar e localizar a falta elétrica. Para detecção de faltas utiliza-se os conceitos da Transformada de Fourier, Transformada Wavelet, Transformada S, Transformação Modal e Redução de Dimensionalidade. O método apresentado auxilia na localização do trecho defeituoso.

Em CAVALCANTI e ALMEIDA (2015), o problema de localização de faltas é tratado a partir da estimativa de variações de tensão durante a ocorrência. As variações são calculadas utilizando a matriz de impedância da rede elétrica para todos os barramentos. A partir da diferença entre o valor de tensão medido e o valor de tensão simulado durante as variações, determina-se o provável trecho de ocorrência da falta.

Em (VIANA; ARAUJO; PENIDO, 2016) apresenta-se um método de detecção de faltas com impedâncias de defeito elevada utilizando medições descentralizadas da componente de sequência zero da corrente elétrica. Também a rede elétrica é dividida em regiões e as localizações as faltas se faz em cada uma delas.

Krishnathevar e Ngu (2012) apontam algumas desvantagens dos métodos de localização de faltas que envolvem as impedâncias da rede elétrica utilizando ondas viajantes. Este trabalho identifica o alimentador que apresenta defeito da rede elétrica e a partir deste se calcula o local da falta com precisão, independentemente do tipo de falta de ocorrência.

Gong e Guzmán (2013), apresentam uma solução para localização de faltas em sistemas de distribuição de modo a reduzir o tempo de duração da interrupção. O método se auxilia de medições de tensão e de corrente no instante do curto-circuito. Faz um cálculo da reatância total desde o local do medidor até o ponto de ocorrência da falta para se auxiliar nos cálculos.

Uma outra metodologia para localização de faltas em sistemas de distribuição é apresentada no trabalho de Bísvaro, Pereira, Kezunovic e Mantovani (2016), o qual detecta, classifica e localiza a falta elétrica através da análise do sinal por meio da transformada Wavelet.

Também utilizando o método de impedâncias, Alwash, Ramachandaramurthy e Mithulananthan (2015), tratam a localização de faltas considerando um sistema de distribuição com Geração Distribuída - GD. Ao identificar a falta, sua localização é feita pela comparação entre os valores de tensão obtido pelos medidores instalados no barramento da subestação e nos barramentos da GD, e a partir do valor retornado pela diferença, estima-se o possível local da falta.

Em (TRINDADE; FREITAS, 2016) utilizam também o método das impedâncias utilizando medidores inteligentes para determinar o ponto de ocorrência da falta de modo eficiente. Entretanto, os autores indicam que o uso de medidores inteligentes restringe a localização da falta porque estes são colocados somente em algumas regiões da rede elétrica.

A dissertação disposta por (PEREIRA, 2007), apresenta um algoritmo para localização de faltas em alimentadores trifásicos aéreos com cargas desequilibradas. Utilizando o método de fluxo de potência *backward/forward sweep* são construídas equações da rede para compor a técnica apresentada, a qual necessita de medidores de tensões na barra inicial do alimentador e também em alguns pontos ao longo do mesmo. Para comprovar sua eficiência, os testes foram feitos em sistemas de 13,8kV e 134 nós, pertencente a um sistema real.

Em outra dissertação (LEITE, 2017), aplicam-se duas metodologias relacionadas a faltas de alta impedância. A primeira é utilizada para identificar a existência da ocorrência da falta na rede elétrica, e a segunda, para localizar o ponto de falta elétrica. A identificação é baseada no fator de desequilíbrio visto no terminal secundário do transformador de distribuição, enquanto a localização é feita a partir de medidores inteligentes que comparam o fator de desequilíbrio em cada transformador de distribuição.

### **1.3 Objetivos**

Como citado, o número de ocorrências de faltas elétricas em um SDEE tem tornado necessário o desenvolvimento de técnicas que sejam eficientes na solução do problema para que os consumidores não sejam afetados e sofram consequências em cascata por essa causa.

Desta forma, este trabalho consiste em aplicar a técnica híbrida GRASP-VNS para localizar uma falta em SDEE com auxílio de alguns medidores convencionais instalados na rede elétrica. Para isso é conceituado a teoria de fluxo de potência e análise de curto circuito visando a estimação de estado da rede elétrica, juntamente a



teoria específica das técnicas propostas. Finalmente é mostrado os resultados em redes elétricas utilizadas para desenvolvimento da técnica.

#### **1.4 Organização do Trabalho**

No Capítulo 1 foi apresentado o problema de localização de faltas em SDEE e como isso afeta às concessionárias de energia elétrica, bem como os índices de QEE que são indicadas pelas agências reguladoras devendo estas empresas atender valores indicados.

O capítulo 2 aborda os sistemas de distribuição de energia elétrica, tendo em visto o objetivo do trabalho, apresenta-se a modelagem dos componentes dos SDEE para análise de fluxo e de curto-circuito.

O capítulo 3 aborda a análise de fluxo de potência voltado aos SDEE.

O capítulo 4 aborda a teoria de curto-circuito em redes elétricas considerando todos os tipos de curto-circuito, a qual será utilizada pela metodologia de localização de faltas.

O capítulo 5 apresenta a técnica de otimização híbrida GRASP-VNS, utilizada para resolver o problema apresentado neste trabalho. Toda teoria é abordada, assim como o funcionamento do algoritmo que será ilustrado.

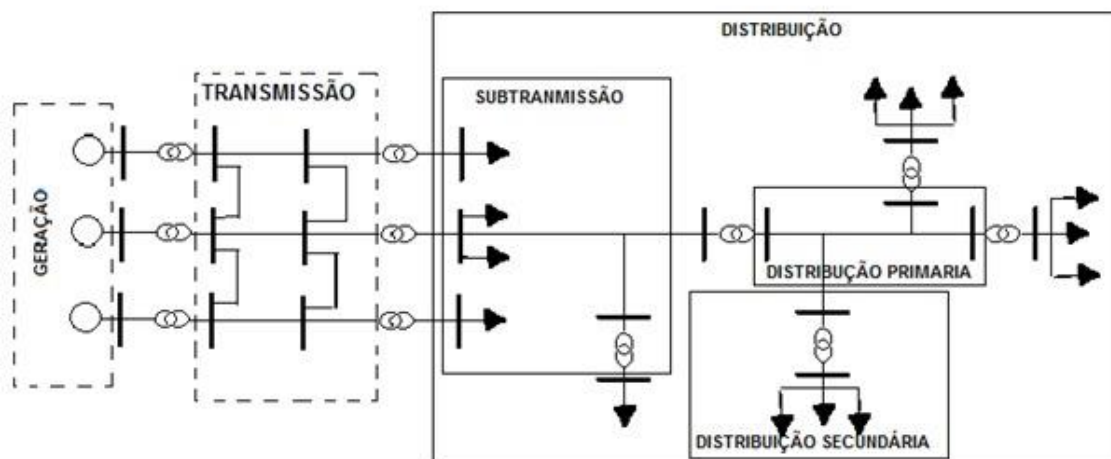
## 2. O SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA

Os sistemas elétricos têm a função de fornecer energia elétrica aos consumidores, os quais podem ser subdivididas em três etapas, sendo elas:

- Geração: Realiza a conversão de alguma forma de energia em energia elétrica. Aqui se inserem as usinas hidrelétricas, eólicas, solares, nucleares, dentre outras diversas responsáveis por gerar energia.
- Transmissão: Transporta a energia gerada por meio das linhas de transmissão até os centros urbanos.
- Distribuição: Distribuem a energia elétrica que chega das linhas de transmissão, em um nível inferior ao que foi transmitido, para os consumidores residenciais, comerciais e industriais.

A Figura 1 apresenta um diagrama unifilar típico de um sistema elétrico de potência considerando-se três usinas geradoras, apenas para entendimento.

Figura 1: Diagrama Unifilar de um Sistema Elétrico de Potência considerando 3 usinas geradoras.



Fonte: Adaptado de (KAGAN,2010).

Uma das diferenças entre redes de distribuição e redes de transmissão é com relação à topologia, onde a primeira opera de forma radial e, a segunda, em forma malhada. A Figura 1 ilustra um sistema elétrico de potência como um todo, desde as fontes de geração até as cargas de distribuição.

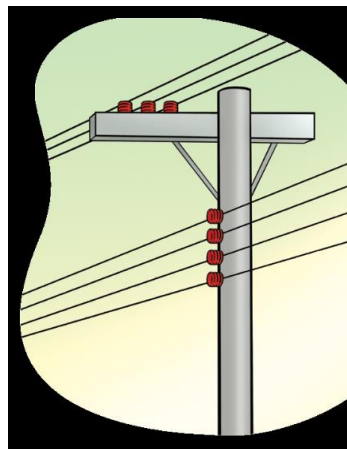
## 2.1 Sistemas de Distribuição

Os SDEE's recebem a energia proveniente dos sistemas de transmissão através de subestações de distribuição, onde são feitas as transformações de energia para abaixar os níveis de tensão para o atendimento aos consumidores.

A conexão, o atendimento e a entrega efetiva da energia elétrica ao consumidor são feitas por parte das concessionárias de energia elétrica. Atualmente, do total da energia elétrica distribuída no Brasil, a administração desta energia é feita pelo setor privado com um percentual de 60% enquanto o setor público administra 40%. (ABRAADE, 2015).

Os SDEE's estão compostos por linhas de média e baixa tensão, as quais são suportadas por postes. Linhas de média tensão são representadas por níveis de tensão que variam entre 1 e 69 kV, enquanto linhas de baixa tensão se referem a tensões iguais ou inferiores à 1 kV. (ANEEL, 2015). Nas linhas de baixa tensão estão conectados os consumidores residências e comerciais, já nas linhas de média tensão estão conectados os consumidores industriais. A Figura 2 apresenta o acondicionamento das linhas em um poste, onde as linhas superiores em horizontal são as linhas de média tensão, enquanto as inferiores na vertical são as de baixa tensão.

Figura 2: Poste de concreto contendo linhas de média e baixa tensão



Fonte: (ABRAADE, 2015).

## **2.2 Proteção de Sistemas de Distribuição**

Os SDEE estão sujeitos a situações que causem distúrbios em suas condições normais de operação, sendo a maioria representados por condições de curto-circuito, conforme apresentado no capítulo 3 (FUJI SATO, 2005). Para reduzir os impactos destes distúrbios os sistemas elétricos possuem equipamentos de proteção ao longo da rede elétrica, cujo objetivo é garantir a integridade dos equipamentos presentes, assim como danos aos consumidores ou cargas.

Os equipamentos de proteção de SDEE são incumbidos de realizar a proteção e devem atuar de forma seletiva e coordenada, isolando apenas as partes sujeitas aos defeitos provocados pelo curto-circuito e mantendo os demais trechos do sistema em operação. (MAMEDE, 2013).

Dentre os equipamentos de proteção utilizados nos SDEE, os religadores automáticos e as chaves fusíveis, os quais atuam visando proteger os componentes da rede elétrica no instante da ocorrência de faltas elétricas ou condições anormais de operação, que podem ser caracterizadas por defeito de equipamentos instalados na rede elétrica, respeitando condições de atuação criteriosas (seletividade e coordenação da proteção), de modo que a área atingida seja rapidamente isolada do restante da rede. (FUJI SATO, 2005).

A seguir são apresentados os dispositivos de proteção e o seu respectivo princípio de funcionamento no SDEE.

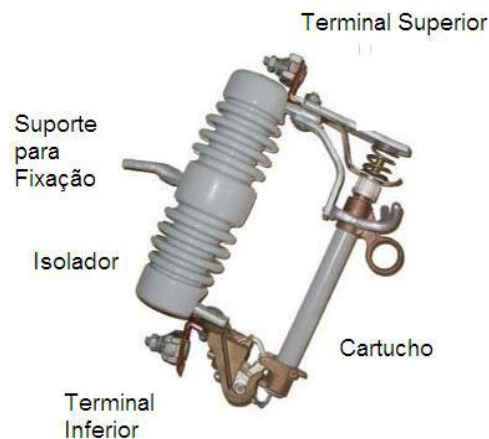
### **2.2.1 Chave Fusível e Elo fusível**

Chaves fusíveis são os elementos mais utilizados na proteção de SDEE por apresentar preços reduzidos e desempenho satisfatório para o nível de proteção desejado. No interior do cartucho da chave fusível está instalado o elo fusível, elemento de proteção responsável por sensibilizar e atuar durante a ocorrência de uma falta elétrica (MAMEDE, 2013).

O elo fusível mostrado na Figura 3 é elemento facilmente substituível, onde durante a ocorrência de uma falta elétrica ocorre a fusão do elemento devido ao efeito

Joule. A produção de gases desionizantes no interior do cartucho provenientes do arco elétrico traz como consequência o aumento da pressão no interior do dispositivo e assim, a desconexão do terminal superior, fazendo com que o circuito defeituoso seja devidamente isolado. (MAMEDE, 2013).

Figura 3: Chave fusível.



Fonte: (Catálogo CEMIG, 2017).

## 2.2.2 Religadores Automáticos

Religador automático é um dispositivo mostrado na Figura 4 e utilizado comumente em SDEE frente à existência de sobrecorrente consequência de um curto-circuito, desligando e religando um determinado número de vezes de forma automática.

O mecanismo de funcionamento deste equipamento é a partir do registro de uma condição de sobrecorrente, a circulação desta é interrompida pela abertura dos contatos do religador, sendo mantidos em aberto por um período de tempo, conhecido como tempo de religamento, e ao serem fechados, detecta a persistência da corrente. Caso a sobrecorrente ainda exista, os contatos são abertos novamente, do contrário, os contatos fecham e a linha continua funcionando. O procedimento é realizado normalmente por três vezes. (ABB, 2016).

Figura 4: Religador Automático.



Fonte: (ABB, 2016)

### 2.2.3 Seccionadores Automáticos

O seccionador automático mostrado na Figura 5 é um dispositivo responsável por abrir seus contatos quando o circuito é desenergizado pela atuação de um equipamento de proteção situado em sua retaguarda.

Este equipamento é constituído por um sensor de sobrecorrente e um mecanismo para contagem de desligamentos. No instante da ocorrência de uma sobrecorrente da linha a qual está conectada, o dispositivo é armado e preparado para contagem de faltas. Se a falta persistir este se abre e interrompe a corrente. (Catálogo CEMIG, 2017).

Figura 5: Seccionizador automático.



Fonte: (Catálogo CEMIG, 2017).

#### 2.2.4 Relés de sobrecorrente

Trata-se do dispositivo mostrado na Figura 6 que atua comandando a abertura do disjuntor de modo a proteger os equipamentos instalados no SDEE contra possíveis danos causados por um curto-circuito. Os relés de sobrecorrente atuam em conjunto com seccionalizadores e religadores automáticos, onde, ao sensibilizarem por uma sobrecorrente, o seccionizador comanda a abertura do circuito e o religador efetua as tentativas de religamento automático no circuito com base em um ciclo de operação. (CEMIG, 2017)

Figura 6: Disjuntor com relé de proteção de sobrecorrente para aplicação em instalações industriais.



Fonte: (SCHNEIDER, 2016).

## 2.3 Modelagem dos Componentes de uma Rede de Distribuição para Análise de Fluxo de Potência

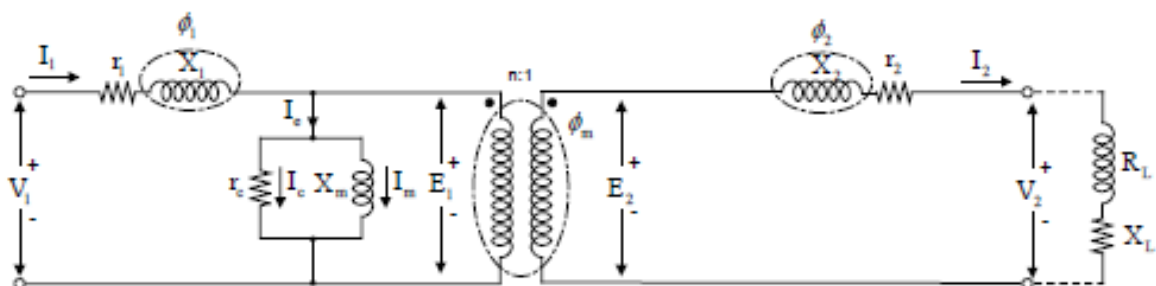
Para implementar a metodologia proposta neste trabalho é necessária a análise de fluxo de carga e curto-circuito em um SDEE. Para isso é necessário aplicar os modelos dos componentes do SDEE, os quais serão apresentados a seguir.

### 2.3.1 Modelo do Transformador

Os transformadores de distribuição são equipamentos que consistem em dois enrolamentos que envolvem um núcleo ferromagnético, onde uma de suas bobinas é considerada como o lado primário e a outra, o lado secundário. Pela bobina primária chega o nível de tensão que será transformado para um outro nível, saindo pela bobina secundária. Para fins de cálculos, considera-se a modelagem do transformador em condições ideais de operação, desconsiderando todos os tipos de perdas do equipamento. Contudo, para um cenário real, essas perdas devem ser consideradas.

A Figura 7 ilustra a modelagem de um transformador real, considerando suas perdas no núcleo, as relutâncias do circuito magnético, as resistências dos enrolamentos e as fugas magnéticas. (CAPARÓ, 2005).

Figura 7: Esquemático de um Transformador Real com uma carga acoplada ao lado secundário.



Fonte: (CAPARÓ, 2005).

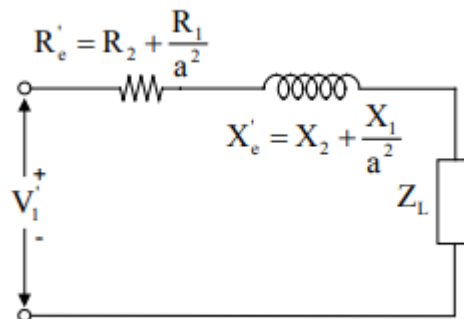
Além das grandezas que são comuns ao do transformador ideal, algumas grandezas são acrescentadas ao circuito equivalente, sendo elas:



$X_1, X_2$	Reatâncias de dispersão dos enrolamentos primário e secundário;
$R_1, R_2$	Resistências dos enrolamentos primário e secundário;
$R_c$	Resistência que trata as perdas do ferro;
$X_m$	Reatância que trata a corrente em vazio;
$I_e$	Corrente à vazio;
$I_c$	Corrente parasita;
$I_m$	Corrente magnetizante;
$\Phi_m$	Fluxo mútuo;

Contudo, os transformadores podem ser representados no SDEE por um modelo simplificado, constituído apenas pela sua impedância de dispersão equivalente conforme ilustrado na Figura 8.

Figura 8: Circuito equivalente do transformador com impedância referida ao secundário



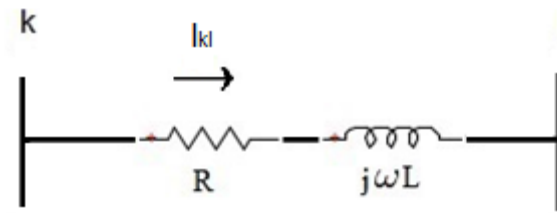
Fonte: (CAPARÓ, 2005).

### 2.3.2 Modelo da Linha

As linhas de um sistema elétrico de potência podem ser representadas por três modelos: linha longa, linha média e linha curta. Para um SDEE são considerados os modelos de linha curta pelo fato destas terem comprimento menor quando comparadas com as linhas de um sistema de transmissão (KAGAN, 2010).

A Figura 9 ilustra a modelagem de uma linha de distribuição em um modelo de linha curta.

Figura 9: Modelagem de uma linha de distribuição - modelo de linha curta.



Onde:

$I_{kl}$	Corrente elétrica que flui entre as barras $K$ e $L$ ;
$j\omega L$	Reatância da linha;
$R$	Resistência da linha.
$K$	Barra " $K$ ".
$L$	Barra " $L$ ".

#### 2.3.4 Modelo de Cargas

Cada carga tem o seu comportamento em regime permanente definido pela variação de seus parâmetros elétricos em relação a variação da tensão. Sendo estes parâmetros a potência, a corrente e a impedância. A partir destas características as cargas são classificadas da seguinte forma:

- Cargas de potência constante;
- Cargas de corrente constante;
- Cargas de impedância constante;
- Cargas constituídas pela composição dos modelos anteriores.

### Cargas com Potência Constante

São cargas cujas potências ativas e reativas são invariantes com a variação da tensão, ou seja, as potências têm valores nominais independente da tensão aplicada. Dada a potência nominal da carga  $S_{esp}$  é calculada a corrente  $I$  com valores de tensão  $V$ . utilizando a Equação 2.1.

$$I = \left( \frac{S_{esp}}{V} \right)^* \quad (2.1)$$

### Cargas com Corrente Constante

Este modelo é representado por cargas onde a magnitude da corrente e o ângulo entre a tensão e a corrente não sofrem alterações. Sendo assim, a corrente é definida como:

$$I_{esp} = \frac{S^*}{V^*} \quad (2.2)$$

Onde:

$I_{esp}$ : Corrente elétrica especificada;

\* Representa o conjugado da potência e tensão.

### Cargas com Impedância Constante

São cargas cujas com impedâncias invariantes com variações de tensão. Sendo calculada a impedância nominal com valores de tensão  $V_{esp}$  e potência nominal  $S_{esp}$  aplicando a Equação 2.3.

$$Z_{esp} = \frac{V_{esp}^2}{S_{esp}^*} \quad (2.3)$$

Desta forma é calculada a corrente  $I$  para diferentes valores de tensão como indica a Equação 2.4.

$$I = \frac{V}{Z_{esp}} \quad (2.4)$$

### Cargas Constituídas pela Composição dos Modelos Anteriores

O modelo combinado representa a combinação de todos os modelos apresentados anteriormente. Assim, o modelo de cargas é representado pela seguinte equação:

$$I = \frac{\alpha}{100} \cdot \left( \frac{S_{esp}^*}{V} \right) + \frac{\beta}{100} \cdot \left( \frac{V \cdot S_{esp}^*}{V_{esp}^2} \right) + \frac{\delta}{100} \cdot \left( \frac{S_{esp}^*}{V_{esp}} \cdot \frac{V}{|V|} \right) \quad (2.5)$$

Onde:

- $\alpha$  é a porcentagem de carga com potência constante.
- $\beta$  é a porcentagem de carga com impedância constante.
- $\delta$  é a porcentagem de carga com corrente constante.
- $\alpha + \beta + \delta = 100$ .

A equação anterior pode ser escrita de forma simplificada:

$$I_L = \alpha \cdot I_L^P + \beta \cdot I_L^Z + \delta \cdot I_L^C \quad (2.6)$$

### **3. FLUXO DE POTÊNCIA E CURTO CIRCUITO**

A análise de fluxo de potência em um SDEE consiste em determinar o estado da rede em regime permanente em um certo instante de operação, ou seja, determinar tensões nas barras; fluxo de potência e perdas elétricas ativas nos trechos. (KAGAN, 2005).

Por outro lado, na análise de curto-circuito estima-se o estado da rede no instante da ocorrência de uma falta elétrica, ou seja, calculam-se as tensões nas barras e as correntes nos trechos (KAGAN, 2005).

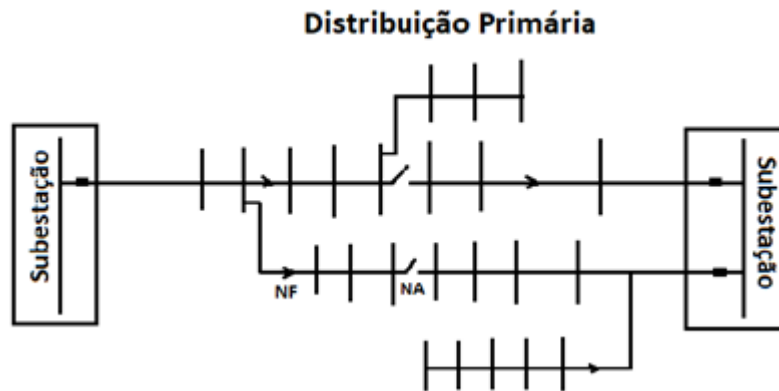
Neste trabalho é utilizada a análise de fluxo de potência para se obter as tensões pré-falta – estado que se caracteriza pelas condições normais de corrente elétrica, tensão e potência em todos os trechos do SDEE – para serem utilizadas na análise de curto circuito, sendo esta responsável por avaliar a função objetivo do modelo matemático do problema de localização de faltas proposto neste trabalho, através da Equação 4.1.

#### **3.1 Fluxo de Potência**

O método implementado neste trabalho foi o método de varredura reversa/direta (MVRD) que consiste em duas etapas. Na primeira calculam-se as correntes em todos os trechos desde as barras finais em sentido da subestação e na segunda etapa atualizam-se as tensões em todas as barras. Por fim, é verificado se a condição de parada do método é satisfeita para determinar se é necessária uma nova iteração. (SHIMURHAMADI, 1989)

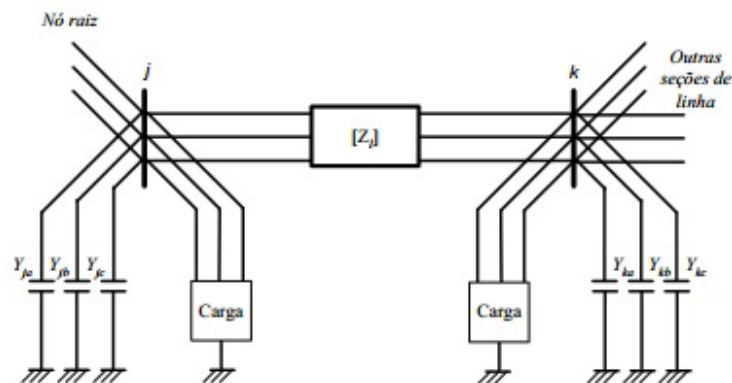
A Figura 10 ilustra um SDEE com topologia radial, representado pelas subestações e as barras que compõem as linhas de distribuição.

Figura 10: Sistema de distribuição primária com topologia radial.



O desenvolvimento do processo de análise de varredura é feito considerando os parâmetros de um trecho da linha de distribuição, representado pela Figura 11. Observa-se que o desenvolvimento é feito para um sistema de distribuição trifásico, foco deste trabalho.

Figura 11: Representação trifásica do trecho de uma linha de distribuição para análise de fluxo de potência.



Fonte: (PEREIRA, 2007).

A impedância da linha entre as barras  $j$  e  $k$  é descrita em forma matricial, da seguinte maneira:

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

Na Equação 3.1 os termos da diagonal principal representam as impedâncias próprias da linha, enquanto os elementos fora da diagonal principal representam 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.

Como dito inicialmente, o processo BFS possui um sentido reverso e direto para o cálculo das grandezas, sendo elas as correntes e tensões nas barras. O primeiro passo do processo consiste em calcular as correntes nas barras pelo sentido reverso, neste passo, é usual estipular valores de tensão em todas as barras como sendo a tensão da subestação. Sendo assim, a obtenção das correntes nas barras é dada pelo seguinte sistema:

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

Onde:

$I_{ja}, I_{jb}, I_{jc}$ , São as injeções de corrente da carga e elemento shunt.

$S_{ja}, S_{jb}, S_{jc}$ , São as potências da carga conectada à barra  $k$ .

$V_{ja}, V_{jb}, V_{jc}$ , São as tensões da barra  $k$ .

A próxima etapa consiste no cálculo das correntes nas linhas da rede do sentido da carga para a subestação. O sistema a seguir representa esta parte do processo:

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

Onde:

$J_{ja}, J_{jb}, J_{jc}$ , São as correntes que fluem na linha 1 e  $M$  representa todos os trechos conectados à jusante da barra  $k$ .

O procedimento direto consiste na atualização das tensões nas barras da rede pelo seguinte sistema:

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

Ao final do processo é feito o critério de parada. O critério de parada que deve ser satisfeito é um valor baixo, pois caso contrário, o algoritmo implementado pode convergir para uma condição de operação diferente da real. O critério de parada é dado pela variação das perdas, indicado pela seguinte expressão:

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

Onde:

$r_{al}, r_{bl}, r_{cl}$ , São as resistências por fase da linha  $l$ .

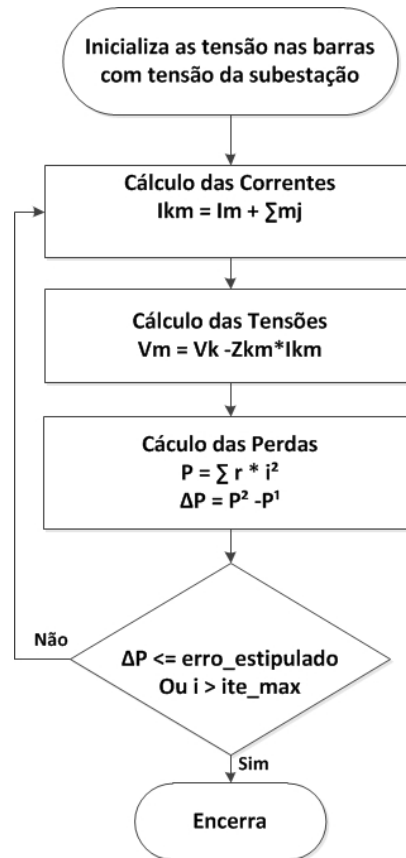
$I_{al}, I_{bl}, I_{cl}$ , São as correntes no trecho da linha  $l$ .

$P_a, P_b, P_c$ , São as perdas totais por fase.

A Figura 12 ilustra o fluxograma o qual contém os passos a serem seguidos para a execução do algoritmo de cálculo de fluxo de potência.



Figura 12: Fluxograma do método BFS de fluxo de potência.



### 3.2 Análise de curto-circuito

Os SDEE estão sujeitos a ocorrências de faltas de caráter aleatório que são responsáveis por causar sérios problemas na operação do sistema elétrico, além de colocar em risco a integridade dos equipamentos, cargas e consumidores. (FUJIO SATO, 2015).

A análise de curto-circuito fornece as correntes nas linhas e as tensões nas barras do sistema durante à ocorrência de uma falta elétrica. A partir destes parâmetros são feitos alguns dos dimensionamentos do SDEE com relação à ajustes de proteção e especificações dos equipamentos, dimensionamento da linha quanto à sua capacidade térmica, coordenação e seletividade entre relés, dimensionamentos de cabos, dentre outros. (KINDERMANN, 1997). Ademais, é possível utilizar essas

informações para a aplicação de técnicas para localização de faltas, conforme o foco deste trabalho.

A Tabela 1 indica os tipos de curto circuito e sua porcentagem de ocorrência no sistema elétrico brasileiro.

Tabela 1: Frequências típicas de ocorrências de curtos – circuitos.

<b>Curto – Circuito</b>	<b>Frequência (%)</b>
Trifásico	5,0
Bifásico	15,0
Bifásico – Terra	10,0
Fase – Terra	70,0

*Fonte: (FUJIO SATO, 2015).*

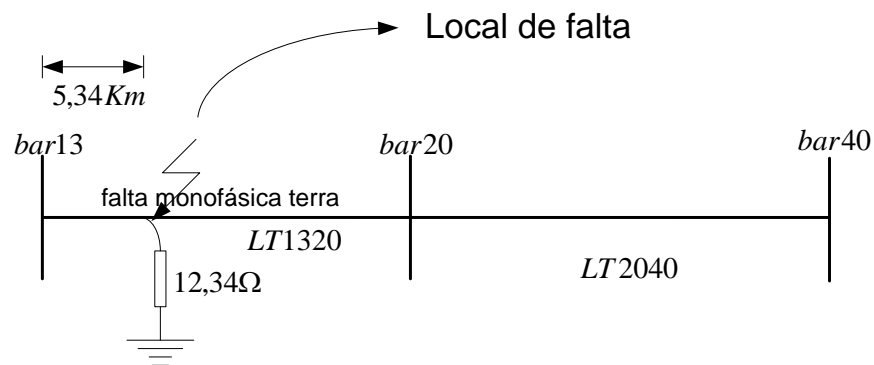
Por outro lado, dada a ocorrência de uma falta elétrica, o sistema de proteção pode interromper o fornecimento de energia elétrica para um determinado grupo de consumidores - faltas permanentes, o qual é o foco deste trabalho. Já faltas transitórias são corrigidas automaticamente a partir do funcionamento dos dispositivos de proteção. Ambos os tipos de curto circuito provocam danos ao SDEE, como por exemplo:

- A corrente de curto circuito provoca a dissipação de potência no circuito de ocorrência, ocasionando graves danos nas instalações elétricas. Em casos da ocorrência do problema, deve-se realizar o reparo no menor tempo possível.
- Durante um curto-circuito, a queda de tensão provoca sérios danos aos consumidores. Sistemas de iluminação, computacionais e de controle em geral são bastante sensíveis à tais quedas.
- O desequilíbrio entre a geração e a carga após a retirada do trecho que sofre a falta pode causar sub ou sobretensões, provocando condições anormais de operação.

A Figura 13 ilustra um exemplo de uma falta elétrica com seus parâmetros correspondentes como:

- Local de falta: 5,34 km da *bar13*.
- Tipo de falta: monofásica para a terra.
- Impedância de defeito: 12,34  $\Omega$ .

Figura 13: Representação de uma falta de energia elétrica, levando em consideração o seu tipo, o local e a impedância de falta.



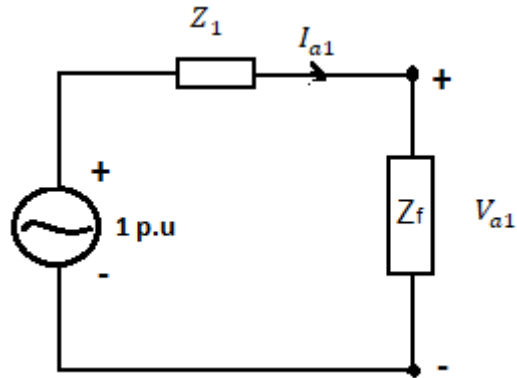
Todas essas informações são levadas em consideração para aplicação da metodologia para localização da falta, a qual será devidamente explicada nos capítulos posteriores.

### 3.3 Tipos de Curto Circuito

#### 3.3.1 Curto-Circuito Trifásico

Em uma rede trifásica, durante a ocorrência de um curto-circuito trifásico, a somatória das correntes de fase é igual à zero (KAGAN, 2010). Sendo assim, o circuito equivalente de sequência positiva é representado por uma fonte de tensão  $V_{th}$ , estipulada como 1 p.u e uma impedância de sequência positiva  $Z_f$ , vista a partir do ponto de curto-circuito, como ilustra a Figura 14, e é suficiente para determinar as correntes de defeito para as três fases da rede.

Figura 14: Circuito equivalente de para análise de um curto-circuito trifásico no sistema de distribuição.



Fonte: (KAGAN ADAPTADO, 2010).

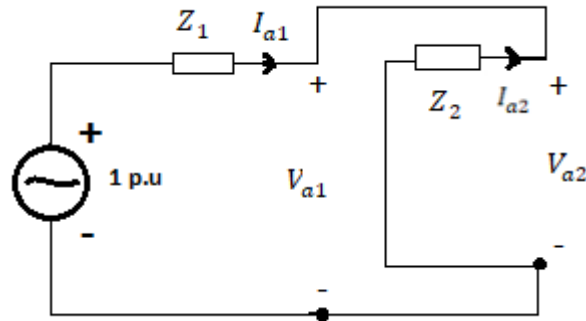
A corrente de curto-circuito em regime permanente pode ser determinada facilmente a partir do circuito equivalente apresentado na Figura 14:

$$I_{\text{curto-circuito}} = I_{a1} = \frac{1_{\text{p.u.}}}{Z_1 + Z_f} \quad (3.7)$$

### 3.3.2 Curto-Circuito Bifásico no sistema Radial

Para o curto circuito bifásico, o circuito equivalente de sua modelagem é representado pela impedância de sequência negativa, que é igual à impedância de sequência positiva, conforme a Figura 15. (KINDERMAN, 1997)

Figura 15: Modelo equivalente em paralelo para o curto-circuito bifásico em um sistema radial.



Fonte: (KINDERMANN ADAPTADO, 1997).

Como mencionado anteriormente,  $Z_1 = Z_2$ . Logo:

$$I_{a1} = \frac{1}{Z_1 + Z_2} = \frac{1}{2Z_1} \quad (3.8)$$

Pela Figura 15, pode-se observar ainda que  $I_{a2} = -I_{a1}$ . Substituindo os valores na matriz de transformação, tem-se:

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ I_{a1} \\ -I_{a1} \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

$$I_b = 1 \cdot 0 + \alpha^2 \cdot I_{a1} - \alpha \cdot I_{a1} = I_{a1} \cdot (\alpha^2 - \alpha) \quad (3.11)$$

Obtendo-se apenas o módulo, tem-se:

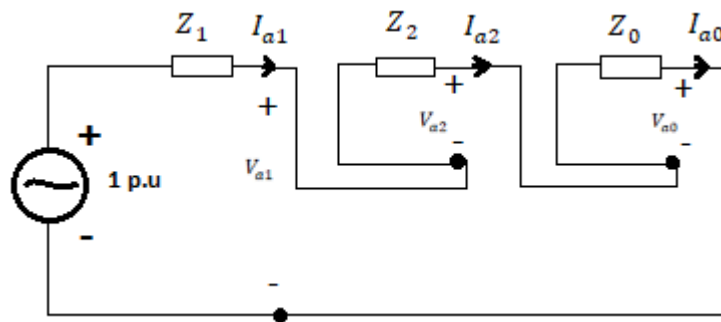
$$I_b = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{1}{|Z_1|} \quad (3.12)$$

$$I_b = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{cc3\phi} \quad (3.13)$$

### 3.3.3 Curto-Circuito Monofásico

O curto circuito monofásico ocorre quando uma das fases do sistema é conectada com a terra. Os circuitos equivalentes de Thévenin das sequências positiva, negativa e zero no ponto de defeito são conectados em série, conforme a Figura 16. (KINDERMANN, 1997).

Figura 16: Modelo em série para o curto-circuito monofásico em um sistema radial.



Fonte: (KINDERMANN ADAPTADO, 1997).

Para esta análise,  $Z_0$  é a impedância da sequência zero acumulada até o ponto de ocorrência da falta. Ademais,  $Z_1 = Z_2$ .

Por se tratar de um modelo em série, tem-se:

$$I_{a1} = I_{a2} = I_{a0} = \frac{1}{Z_1 + Z_2 + Z_0} = \frac{1}{2Z_1 + Z_0} \quad (3.14)$$

Fortescue em seu teorema diz que,  $I_a = I_{a0} + I_{a1} + I_{a2}$ . Logo,  $I_a = 3I_{a1}$ .

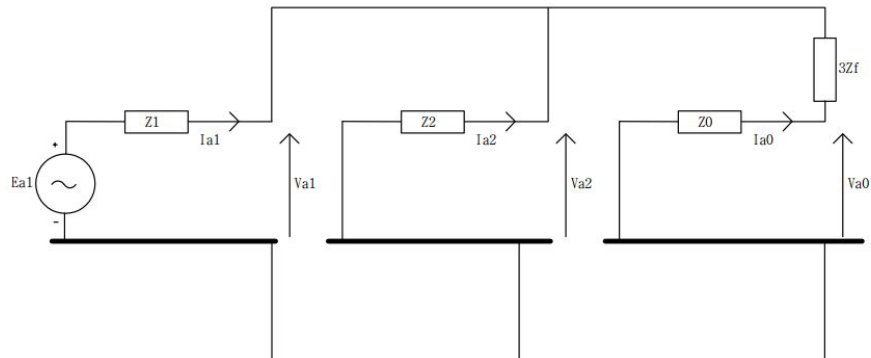
Contudo, o módulo da corrente de curto-circuito monofásico é dado por:

$$I_{cc1\phi} = \frac{3}{|2Z_1 + Z_0|} \cdot I_{base} \quad (3.15)$$

### 3.3.4. Curto-Circuito Bifásico Assimétrico

Os tipos de curto circuito apresentados nas seções anteriores consistem em faltas diretas entre linhas, ou entre uma ou duas linhas para a terra. Entretanto, a maioria das faltas que ocorrem no sistema elétrico resultam em uma impedância entre a linha e a terra, cujo valor depende das resistências do arco elétrico, do material do componente onde ocorreu a falta e diversos outros fatores. Contudo, considerando a impedância de defeito, o curto-circuito bifásico-terra possui o modelo equivalente representado pela Figura 17 a seguir.

Figura 17: Modelo curto-circuito bifásico assimétrico.



Fonte: (STEVENSON ADAPTADO, 1986).

Sendo assim, é possível chegar às seguintes equações:

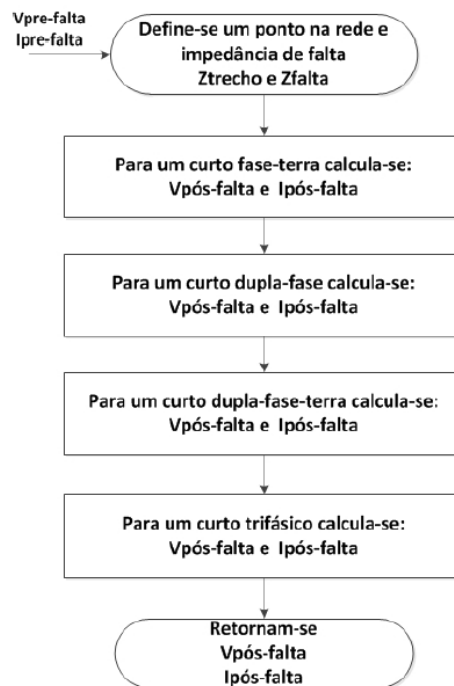
$$I_{a1} = \frac{E_{a1}}{Z_1 + \frac{Z_2(Z_0 + 3Z_f)}{Z_2 + Z_0 + 3Z_f}} \quad (3.16)$$

$$I_{a2} = - \frac{(Z_0 + 3Z_f)}{Z_2 + Z_0 + 3Z_f} I_{a1} \quad (3.17)$$

$$I_{a0} = - \frac{(Z_0 + 3Z_f)}{Z_2 + Z_0 + 3Z_f} I_{a1} \quad (3.18)$$

No entanto, a análise de curto-circuito em uma rede elétrica tem como finalidade a obtenção de todas as correntes e tensões pós falta em todos os trechos da mesma. A Figura 18 ilustra o fluxograma para cálculo de curto circuito.

Figura 18: Fluxograma para análise de curto-circuito de um SEP.



Fonte: (FREITAS, 2017).



#### 4. PROBLEMA DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS

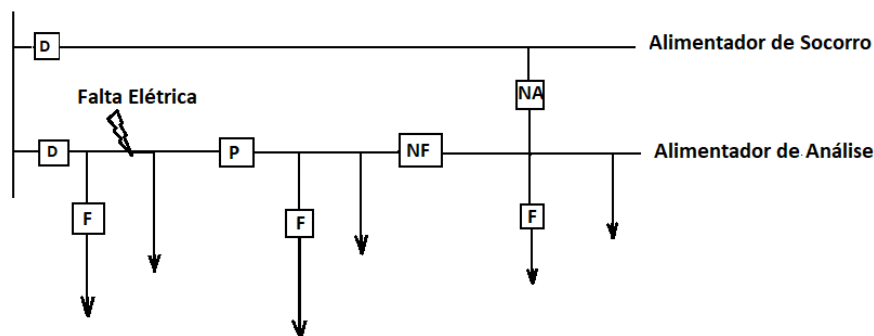
Com o passar dos anos e com os avanços tecnológicos, os SDEE's tornaram-se mais complexos gerando a necessidade de fazer maiores investimentos nas diferentes partes da rede elétrica, uma delas é no sistema de proteção, a qual está diretamente relacionada ao problema deste trabalho e visa atender aos critérios de QEE estabelecidos pela ANEEL.

Reduzir o tempo de interrupção do fornecimento de energia diante uma falta elétrica representa um desafio para as empresas de distribuição, tendo em vista às exigências das normas, as quais, frente ao incumprimento pode gerar ressarcimentos aos consumidores e até multas (ANEEL 024/2000).

Faltas elétricas ocorrem nas redes elétricas de forma programada, como os casos das manutenções elétricas (interrupções) e de forma aleatória, por exemplo, contato de árvores com linhas elétricas, rompimento de cabos elétricos, falha em equipamentos elétricos, descargas atmosféricas, dentre outros motivos. Na ocorrência de um desses eventos, o sistema de proteção do SDEE deve atuar, interrompendo o fornecimento de energia elétrica de um grupo de consumidores (KINDERMANN, 1997). Diante disso, torna-se necessária a busca por métodos que possibilitem identificar o local de ocorrência da falta de uma forma rápida e eficiente.

Após identificar o local de ocorrência da falta, é feita a restauração (via abertura e/ou fechamento de chaves) do fornecimento de energia elétrica de uma parte dos consumidores afetados para depois realizar o reparo do problema e finalmente reestabelecer a energia elétrica a todos os consumidores afetados. (KAGAN, 2010).

Figura 19: Rede para análise de interrupção.



Fonte: (KAGAN, ADAPTADO)

A modo de exemplo tem-se a rede elétrica ilustrada da Figura 19, a qual possui disjuntores  $D$ , chave de proteção  $P$ , chaves fusíveis  $F$ , chave de seccionamento  $NF$  e a chave de socorro  $NA$ . Dada a ocorrência de uma falta no alimentador de Análise, o reestabelecimento do fornecimento de energia é dado pela seguinte sequência de passos:

1. O disjuntor  $D$  do alimentador de análise atua interrompendo o serviço de energia elétrica dos consumidores à jusante do disjuntor.
2. Um ou mais consumidores ligam para a empresa de distribuição informando que estão sem energia elétrica.
3. Uma equipe de manutenção se desloca até a região onde estão os consumidores que informaram falta de energia elétrica. Esta equipe percorre o alimentador e ramais da rede elétrica visando identificar o local exato da falta e a chave que atuou. A falta é isolada abrindo a chave de proteção  $P$ .
4. A chave  $NA$  é fechada para suprir o fornecimento de energia elétrica a uma parte dos consumidores.
5. É realizado o reparo. Em seguida a chave  $NA$  é aberta, a chave de proteção  $P$  é fechada e o disjuntor é ligado, reestabelecendo o fornecimento de energia a todos os consumidores afetados.

O procedimento é realizado toda vez que ocorre uma falta elétrica e as informações são registradas no histórico do sistema de dados da empresa distribuidora. (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2010).

Neste processo de restabelecimento de energia elétrica, a rápida localização do local da falta é crucial. Para isso, as empresas se auxiliam de hardware e software, evitando que a equipe de manutenção faça um rastreamento na rede elétrica, pois o tempo de rastreamento pode ser demorado. O uso de medidores é necessário já que auxilia as técnicas que tratam este problema.

#### **4.1 Modelo matemático do problema de localização de faltas**

O problema de localização de faltas neste trabalho é modelado através de uma função objetivo representada pela Equação 4.1, a qual deve ser minimizada. Esta

consiste em calcular no instante da ocorrência de um curto-circuito a distância entre os valores das tensões registrados pelos medidores instalados no SDEE e estimados via simulação, realizando a comparação entre estas grandezas. Esta distância é calculada pelo método dos Mínimos Quadrados. (PEREIRA, 2007)

$$f_{aval} = \sum_{i=1}^{Nm} [(V_{m,A} - V_{cA})^2 + (V_{m,B} - V_{cB})^2 + (V_{m,C} - V_{cC})^2] \quad (4.1)$$

s.a.

Onde,

i: Início do contador utilizado no somatório da equação.

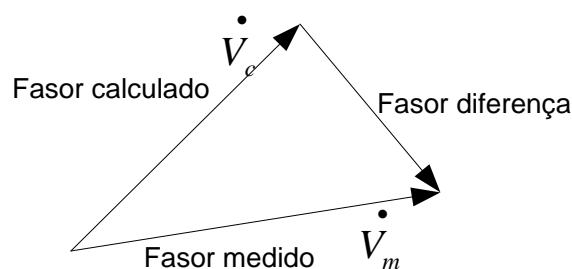
$V_{m,A}$ : Magnitude da tensão lida pelo medidor  $m$  na fase A;

$V_{cA}$ : Magnitude da tensão calculada na barra do medidor  $m$  na fase A;

$Nm$ : Número de medidores instalados na rede.

Caso os equipamentos de medição possuam respostas de valores fasoriais das tensões, para o cálculo da função de avaliação será aplicado o método da Distância Euclidiana como ilustra a Figura 20.

Figura 20: Método da Distância Euclidiana.



Fonte: Adaptado de (ZVIETCOVICH, 2011).

A maioria dos problemas de otimização apresentam restrições. No problema em questão, as restrições serão as próprias do cálculo de curto-circuito.

## **5. MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO PARA SOLUCIONAR O PROBLEMA DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS**

A aplicação de técnicas metaheurísticas para resolver problemas de otimização tem como objetivo encontrar soluções de alta qualidade, movendo-se de uma solução para outra por regiões (conjunto de soluções) que não são exploradas quando utilizadas outras técnicas (BLUM C; ROLI A.; 2003). Sendo algumas características destas técnicas:

- Utilizam estratégias para guiar o processo de busca;
- Exploram de maneira eficiente o espaço de busca, com o objetivo de encontrar uma solução ótima próxima ao ponto atual;
- Utilizam técnicas de buscas locais para encontrar possíveis soluções ao problema;
- Possuem mecanismos que evitam o aprisionamento dos mesmos em regiões restritas do espaço de busca;

Neste trabalho é utilizada a metaheurística Greedy Randomized Adaptative Search Procedure - GRASP, a qual consiste em duas etapas: a primeira fase construtiva e a segunda fase de busca local. Para esta última, foi implementado o Variable Neighborhood Search - VNS, com a finalidade de melhorar as soluções encontradas na primeira etapa. A seguir serão detalhadas as duas metodologias.

### **5.1 Greedy Randomized Adaptative Search Procedure – GRASP**

Esta técnica foi desenvolvida por Thomas A. Feo e Maurício G. C. Resende em meados de 1989, sendo um método de otimização combinatória que consiste em escolher um critério de avaliação para um determinado conjunto, onde ao final do processo encontra-se uma solução ótima que atenda a todas as exigências do problema a ser tratado.

O método consiste em um processo iterativo, onde em cada iteração os elementos são avaliados utilizando uma função gulosa que irá medir o benefício da

inserção desse elemento para a solução final. Esse benefício é dito míope, pois é uma avaliação imprecisa. A aleatoriedade do processo permite que o método encontre diversas soluções de boa qualidade.

O GRASP é constituído por duas etapas, sendo a primeira etapa construtiva e a segunda, a de busca local. (OLIVEIRA, 2011).

1. **Construtiva**: Geração Gulosa, Randômica e Adaptativa.

Esta etapa consiste na criação das soluções *Nsol* de forma aleatória, seguindo os passos:

Passo 1: Escolher parte de uma solução final.

Passo 2: Avaliar os elementos que entrarão no conjunto desta solução inicial.

Passo 3: Construir uma lista com as variáveis mais atraentes, utilizando um indicador de sensibilidade.

Passo 4: Escolher aleatoriamente uma destas variáveis atraentes da lista.

Passo 5: Verificar se o conjunto solução está completo.

2. **Busca Local**: Gerar alguma melhoria na solução corrente (solução final da etapa 1), através de uma busca local na vizinhança para encontrar um local ótimo, ou uma melhor solução.

A etapa de busca local consiste em retornar soluções ótimas a partir das soluções geradas aleatoriamente na primeira etapa (etapa construtiva) do GRASP. Os passos para construção desta etapa são listados da seguinte forma:

Passo 1: Leitura de dados da solução encontrada na fase construtiva.

Passo 2: Obter uma nova solução dentro da vizinhança da solução do passo 1.

Passo 3: Se a nova solução gerada for melhor que a inicial, substitui-se a nova solução.

Passo 4: No caso que a solução gerada no passo 2 não seja melhor, encerra-se esta fase.

## 5.2 Variable Neighborhood Search – VNS

A segunda etapa do GRASP consiste de uma busca local, que tem como objetivo promover melhorias nas soluções encontradas na etapa construtiva por meio de alterações de uma parte da solução. Para isso, foi utilizado a técnica do VNS, a qual, a partir de uma solução atual (solução incumbente) gerada na etapa 1 do GRASP são alterados os parâmetros desta solução, encontrando novas soluções nas diferentes estruturas de vizinhança com a finalidade de encontrar melhores soluções. O algoritmo é detalhado a seguir: (MLADENOVIC e HANSEN (1997)).

**Inicialização:** A partir da solução obtida na etapa construtiva do GRASP, define-se esta como a solução inicial  $x$  e o número de estruturas de vizinhança  $k_{max}$

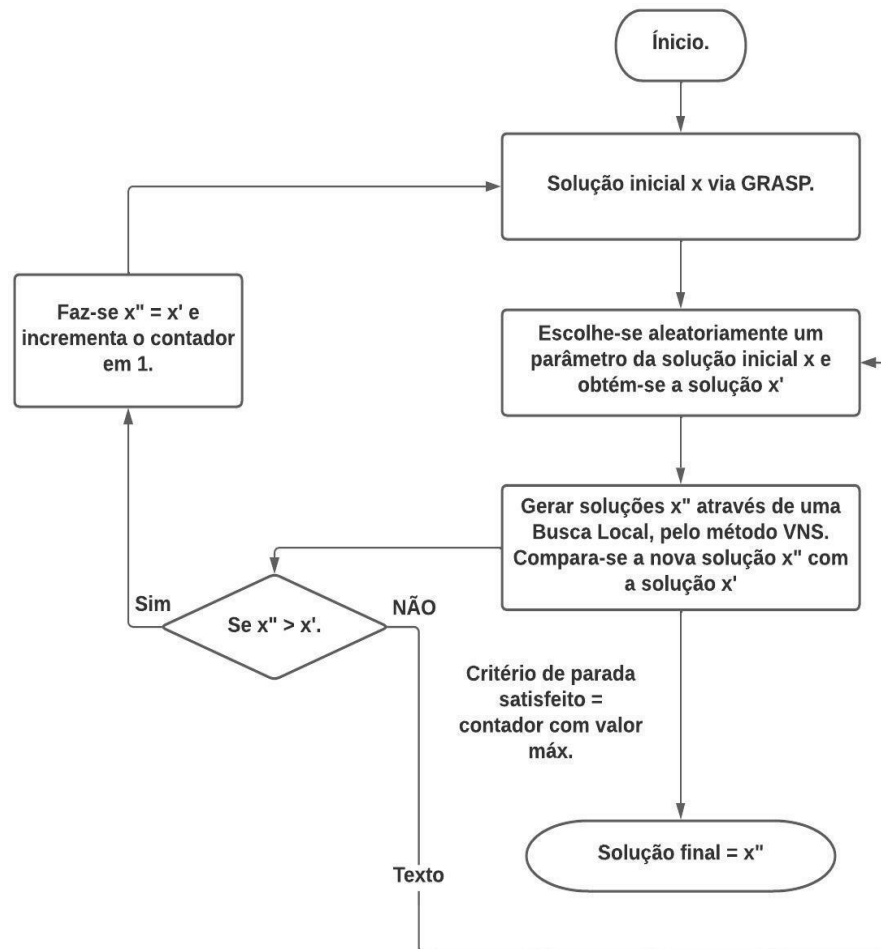
**Repita** os próximos passos até que um critério de parada definido seja satisfeito.

**(1) Repita** os passos a seguir para  $k=1$  até  $k = k_{max}$ :

- (a) **Agitação:** A partir de da solução  $x$  gere aleatoriamente uma outra solução  $x'$  da  $k$ -ésima vizinhança de  $x$  ( $x' \in N_k(x)$ );
- (b) **Busca local:** Aplique algum método de busca local entorno de  $x'$ . Denote esta nova solução como  $x''$ .
- (c) **Mover ou não:** Se a solução  $x''$  é melhor que a incumbente  $x$ , mova para lá ( $x \leftarrow x''$ ) e continue a busca em  $N_1$  ( $k \leftarrow 1$ ); Caso contrário continue a busca local (item b) até atingir o número máximo de visitas locais  $Nro\_Visit\_locais$ . Uma vez atingido este número faça  $k \leftarrow k+1$ .

A Figura 21 ilustra o procedimento de busca local até que se encontre a solução final, partindo de uma solução inicial obtida pela etapa construtiva.

Figura 21: Fluxograma do algoritmo da Busca Local.



### 5.3 Implementação do GRASP – VNS no problema de localização de faltas

Antes de implementar a metodologia é necessário definir a representação de uma solução para o problema, sendo esta indicada na Tabela 2.

Tabela 2: Representação de uma solução para o problema de localização de falta.

Trecho de falta	Distância entre barras	Tipo do curto circuito	Impedância de defeito
5-6	50% da barra 5	Monofásico-terra	5 $\Omega$

Onde cada parâmetro tem o seguinte significado:

- Trecho de falta: Corresponde ao trecho interligado por duas barras. Nos testes feitos foram considerados todos os trechos, podendo se restringir alguns deles utilizando algum critério.
- Distância entre barras: Este valor varia de 0 a 100%. Sendo 0% quando a falta elétrica ocorre na barra de início do trecho e 100% quando o corre na barra final.
- Tipo do curto circuito: Foram considerados os curtos-circuitos do tipo monofásico terra, bifásico, bifásico-terra e trifásico.
- Impedância de defeito: Foram considerados valores na faixa 0  $\Omega$  a 20  $\Omega$ .

Além das informações apresentadas na Tabela 2, também é necessário possuir as informações físicas da rede elétrica - impedâncias das linhas - e de operação - tensão na subestação, potências das cargas, tensões registradas pelos medidores.

Diante da inexistência de dados reais provenientes dos medidores, foi simulado de forma aleatória uma condição de falta elétrica e, a partir de seus resultados, os valores das tensões nos medidores foram preenchidos. A modo de exemplificação, a Tabela 3 representa uma condição de falta na rede elétrica ilustrada na Figura 22.

Tabela 3: Condição de falta ocorrida na rede elétrica.

<b>Parâmetros de Curto-Circuito</b>	<b>Valores escolhidos inicialmente</b>
<b>Trecho do curto circuito</b>	26 - 27
<b>Distância (%)</b>	6 %
<b>Tipo de Curto-Circuito</b>	Monofásico
<b>Impedância de Defeito</b>	1,6 Ohms

Utilizando as ferramentas de fluxo de potência e curto circuito, são preenchidos os registros dos valores eficazes nos três medidores e indicados na Tabela 4.



Tabela 4: Tensão no instante da falta coletada pelos medidores alocados na rede.

Tensão	Va	Vb	Vc
Medidor 1	5,3754	12,5960	12,7532
Medidor 2	12,2087	12,5960	12,7532
Medidor 3	4,7166	12,5960	12,7532

Os passos para implementação da metodologia são detalhados a seguir.

### 5.3.1 Primeira etapa – Método Construtivo

**Passo 1:** Escolher parte de uma solução final: A solução é inicializada com um vetor em branco como indicado na Tabela 5.

Tabela 5: Passo 1 da fase construtiva do GRASP.

Solução	Trecho de falta	Distância entre barras	Tipo do curto circuito	Impedância de defeito
$x =$				

**Passo 2:** Avaliar os elementos que entrarão no conjunto desta solução inicial:

Trecho de falta: Este valor indica o local onde ocorreu de ocorrência da falta elétrica. Poderá participar qualquer trecho da região da rede afetada pela falta.

Distância entre barras (%): Este valor é um porcentual (0-100%) aleatório, onde 0 é na barra 3 e 100 é na barra 4, conforme representado na Tabela 7.

Tipo de Curto-Circuito: Este valor é o tipo de curto-circuito que ocorreu na rede elétrica. Poderá participar da solução qualquer tipo de falta, monofásico, bifásico, bifásico-terra e trifásico.

A Tabela 6 a seguir, indica como é definido cada tipo de curto-circuito para ser representado nas soluções do problema.

Tabela 6: Classificação dos tipos de curto-circuito.

Tipo de Curto-Circuito	Classificação
Tipo 1	Monofásico
Tipo 2	Bifásico
Tipo 3	Bifásico-Terra
Tipo 4	Trifásico

Impedância de defeito: Este valor se refere a impedância de falta ou defeito para aquelas faltas que envolve terra. Poderá participar da solução qualquer valor real entre 0 e  $20 \Omega$  com igual probabilidade.

**Passo 3:** Preencher os dados do vetor solução  $x$  com as informações contidas no passo 2.

A Tabela 7 representa um exemplo de vetor solução  $x$  contendo todos os parâmetros preenchidos de forma aleatória, conforme detalhado anteriormente.

Tabela 7: Passo 1 da fase construtiva do GRASP.

Solução	Trecho de falta	Distância entre barras	Tipo do curto circuito	Impedância de defeito
$x$	3-4	57,8%	Monofásico-terra	17,78 $\Omega$

**Passo 4:** Verificar se o conjunto solução está completo. É necessário conferir os valores dos parâmetros da solução  $x$ , executando uma análise de curto-circuito e comparando valores de tensões estimadas nas barras onde se possui os medidores, para em seguida calcular a função objetivo conforme Equação 4.1

Esta etapa é repetida várias vezes, gerando um número de soluções, sendo que este número depende do tamanho da rede avaliada.

### 5.3.2 Segunda etapa – Busca Local

A solução  $x$  obtida pela etapa construtiva do GRASP será a solução inicial, ou solução incumbente, para a etapa de busca local utilizando o método VNS. Os passos para o desenvolvimento do algoritmo são apresentados a seguir.

**Inicialização:** A solução (gerada na etapa construtiva do GRASP) indicada na Tabela 7 passa a ser a solução  $x$  e o número de estruturas de vizinhança é  $k_{max} = 2$

**Repita** os próximos passos até que um critério de parada definido seja satisfeito.

**(2) Repita** os passos a seguir para  $k=1$  até  $k = 2$ :

**Agitação:** A partir da solução  $x$  gere aleatoriamente uma nova solução  $x'$  da  $k$ -ésima vizinhança de  $x$  ( $x' \in N_k(x)$ ). Para isso, escolhe-se aleatoriamente um dos parâmetros de  $x$  e altera-se gerando a solução  $x'$ . Continuando com o exemplo, altera-se (em  $k=1$ ) o parâmetro “*Distância entre barras*” da solução  $x$  apresentada pela Tabela 7. A nova solução  $x'$ , com o parâmetro alterado, é representada pela Tabela 8 a seguir.

Tabela 8: Solução  $x'$  da Etapa de Agitação do VNS.

Solução	Trecho de falta	Distância entre barras	Tipo do curto circuito	Impedância de defeito
$x'$	3-4	10,54%	Monofásico-terra	17,78 $\Omega$

**Busca local:** Aplique algum método de busca local entorno de  $x'$ . Denote esta nova solução como  $x''$ . Para isso é alterado só um parâmetro de  $x'$ . A Tabela 9 exemplifica a etapa de busca local, onde é alterado o parâmetro “*Tipo de curto circuito*”.

Tabela 9: Solução  $x''$  - Etapa de Busca local do VNS.

Solução	Trecho de falta	Distância entre barras	Tipo do curto circuito	Impedância de defeito
---------	-----------------	------------------------	------------------------	-----------------------

$x''$	3-4	10,54%	<b>Bifásico-terra</b>	17,78 $\Omega$
-------	-----	--------	-----------------------	----------------

**Mover ou não:** Se a função objetivo (Equação 4.1) da solução  $x''$  é melhor que a função objetivo da solução  $x$ , mova para a nova solução ( $x \leftarrow x''$ ) e continue a busca em  $N_1$  ( $k \leftarrow 1$ ). Caso contrário continue a busca local até atingir o número de visitas máxima ( $Nro\_Visit\_Locais$ ), o qual dependerá do tamanho da rede elétrica avaliada.

Para o exemplo em 5.3.1, o valor da função objetivo calculado para a solução  $x''$  foi de 0.3321, enquanto a solução inicial  $x$  foi de 0.4786. Sendo assim, a solução  $x''$  passa a ser a nova solução e o processo de busca local é seguido.

Tabela 10: Valores de tensão nas barras onde estão os medidores – gerados pela solução  $x''$ .

Tensões pós falta	Va	Vb	Vc
<b>Medidor 1</b>	<b>2,6284</b>	12,6297	12,7114
<b>Medidor 2</b>	12,3817	12,6297	12,7114
<b>Medidor 3</b>	<b>8,3917</b>	12,6297	12,7114

## 6. RESULTADOS

A metodologia foi implementada computacionalmente utilizando o Matlab R2016a em um computador com as seguintes especificações: Processador: Intel® Core™ i3-4170 CPU @3.70 GHz, Memória (RAM): 8 GB, Windows 10, 64 Bits.

Com a finalidade de avaliar a metodologia foram utilizadas duas redes em média tensão, sendo uma de 33 barras e outra de maior porte com possuindo 70 barras, ambas do IEEE. Os dados destas redes são ilustrados na Tabela 11.

Tabela 11: Dados das Redes Elétricas.

<b>Dados das redes elétricas</b>			
<b>33 Barras</b>		<b>70 barras</b>	
Nº de trechos	32	Nº de trechos	69
Potência Ativa Total	3,715 MW	Potência Ativa Total	5,88 MW
Potência Reativa Total	2,3 MW	Potência Reativa Total	4,2 MW
Número de Medidores	3	Número de Medidores	3

Na Tabela 12 indicam-se os parâmetros próprios da metodologia. Suas definições não apresentam um critério pré-estabelecido.

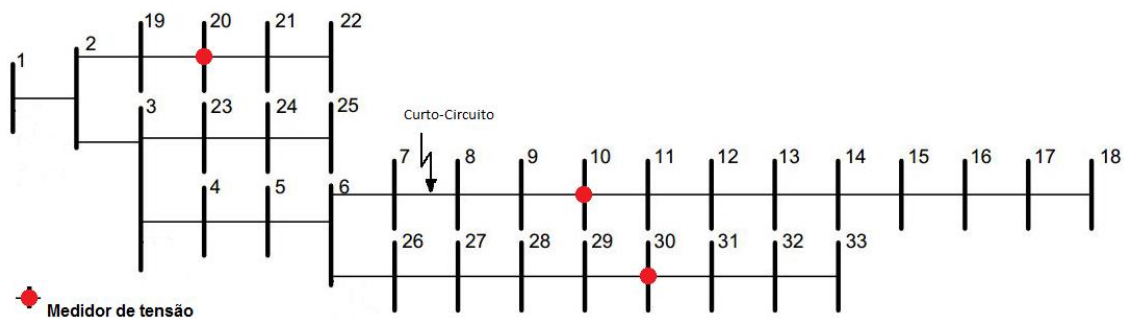
Tabela 12: Parâmetros próprios da metodologia.

<b>Variáveis</b>	<b>Rede 33 barras</b>	<b>Rede 70 barras</b>
Nº de soluções GRASP	100	100
Kmax (VNS)	2	2
Nº de visitas locais	20	30

## 6.1 REDE DE 33 BARRAS

Esta rede opera com um nível de tensão de 12,66 kV, possui 33 barras, 32 trechos e ilustrada na Figura 22. Foi considerada a existência de três medidores de tensão instalados nas barras 10, 20 e 30.

Figura 22: Rede de 33 barras.



Fonte: (IEEE ADAPTADO).

Foi simulada uma falta elétrica com informações indicadas na Tabela 13 e preenchidas as informações nos medidores.

Tabela 13: Parâmetros do curto-circuito para preenchimento dos medidores.

Trecho	% Distância	Tipo de Curto	Z defeito ( $\Omega$ )
7 - 8	50	1 - Monofásico	5

Uma vez utilizada a metodologia foram obtidos os resultados indicados nas Tabelas 14 e 15, sendo eles pelo GRASP (etapa de construção) e VNS (etapa de busca local) respectivamente.

Tabela 14: 10 melhores resultados obtidos pelo método GRASP.

Solução	Trecho	Função Objetivo
1	6 - 7	1,2236

2	9 - 10	1,2118
3	7 - 8	0,9693
4	7 - 8	0,8625
5	8 - 9	1,3685
<b>6</b>	<b>7 - 8</b>	<b>0,7944</b>
7	11 - 12	1,4281
8	10 - 11	1,3147
9	14 - 15	1,3397
10	11 - 12	1,4281

Tabela 15: 10 melhores resultados obtidos pelo método VNS para Busca Local.

Solução	Trecho	Distância (%)	Função Objetivo
1	7 - 8	80	0,4484
2	7 - 8	24	0,4399
3	7 - 8	79	0,4343
4	7 - 8	81	0,4112
5	7 - 8	77	0,406
6	7 - 8	26	0,4041
7	7 - 8	78	0,3985
8	7 - 8	76	0,3918
9	7 - 8	74	0,3634
<b>10</b>	<b>7 - 8</b>	<b>74</b>	<b>0,3631</b>

A Tabela 14 indica os possíveis trechos de ocorrência da falta elétrica, sendo que esta é a informação relevante para o problema de localização de faltas.

A Figura 23 representa a convergência do algoritmo para obtenção da solução procurada, onde estão presentes inicialmente a melhor solução obtida por meio do

GRASP, indicada em destaque pela Tabela 14 e os demais resultados obtidos pelo VNS representados anteriormente na Tabela 15.

Figura 23: Evolução do processo de busca local - VNS - para obtenção do ponto de ocorrência do curto circuito.



De modo a obter confiabilidade no método implementado, foram simulados mais dois cenários de testes, representados pelas Tabelas 16 e 17 a seguir.

Tabela 16: Cenário de teste 2.

Trecho	% Distância	Tipo de Curto	Z defeito ( $\Omega$ )
14 - 15	27 %	Trifásico	5

Tabela 17: Cenário de teste 3.

Trecho	% Distância	Tipo de Curto	Z defeito ( $\Omega$ )
19 - 20	75 %	Monofásico	12

Assim como o primeiro cenário de teste, os testes 2 e 3 foram desenvolvidos seguindo a mesma linha de conceitos. As Tabelas 18 e 19 representam os resultados obtidos.



Tabela 18: Resultados do teste 2 - Rede de 33 Barras.

Possível Solução	Condição de falta			Função Objetivo
	Tipo de Falta encontrada	Trecho/Distância	Zdefeito	
1	Trifásica	14 – 15 (24,28%)	12,29	0,2916
2	Trifásica	14 – 15 (31,34%)	8,98	0,3928
Solução de simetria	Trifásica	31 – 32 (68,29%)	7,23	0,3123

Tabela 19: Resultados do teste 3 - Rede de 33 Barras.

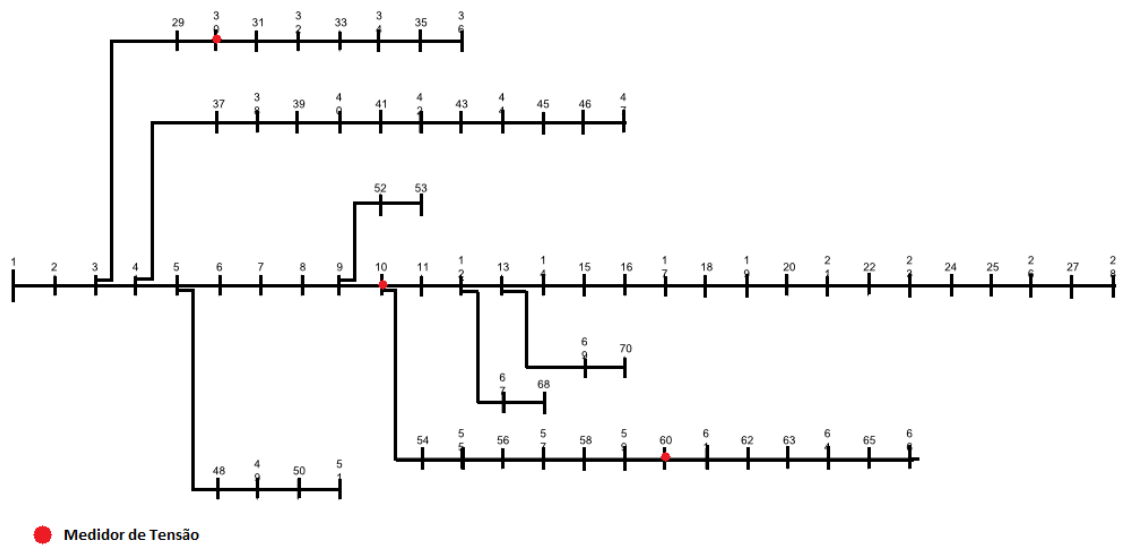
Possível Solução	Condição de falta			Função Objetivo
	Tipo de Falta encontrada	Trecho/Distância	Zdefeito	
1	Monofásica	19 - 20 (76,65%)	7,01	0,1904
2	Monofásica	19 - 20 (79,23%)	14,86	0,3112
Solução de simetria	Monofásica	3 – 23 (68,29%)	9,18	0,2093

Os resultados encontrados para os dois cenários apresentam possíveis soluções de locais de ocorrência da falta elétrica. Observa-se que a metodologia encontrou os trechos procurados e também outros trechos distantes do local de falta. Sendo estes casos chamados de simétricos, os quais são característicos em redes que operam de forma radial.

## 6.2. Rede de 70 barras

Esta rede opera com um nível de tensão de 12,66 kV, possui 70 barras, 69 trechos. A Figura 24 ilustra esta rede e indica as barras onde estão instalados os medidores de tensão.

Figura 24: Rede de 70 barras.



Fonte: (IEEE ADAPTADO).

Neste cenário, os medidores são alocados nas barras 10, 30 e 60, respectivamente. Os valores foram preenchidos com um curto-circuito representado pela Tabela 20, o qual representa o trecho de ocorrência que deve ser encontrado.

Tabela 20: Vetor de parâmetros do curto-circuito.

Trecho	% Distância	Tipo de Curto	Z defeito ( $\Omega$ )
30 - 31	70	1	15

Para a localização da falta, a etapa construtiva retornou os 10 melhores resultados onde, escolhendo-se o resultado em destaque, será feita a etapa de busca local pelo método VNS. As Tabelas 21 e 22 representam os resultados encontrados após a última iteração dos dois métodos.

Tabela 21: 5 melhores soluções obtidas pelo método construtivo - GRASP.

Solução	Trecho	F.Obj
1	30 - 31	0,0658
2	<b>30 - 31</b>	<b>0,0404</b>
3	30 - 31	3,2745
4	30 - 31	3,2700
5	30 - 31	1,7244

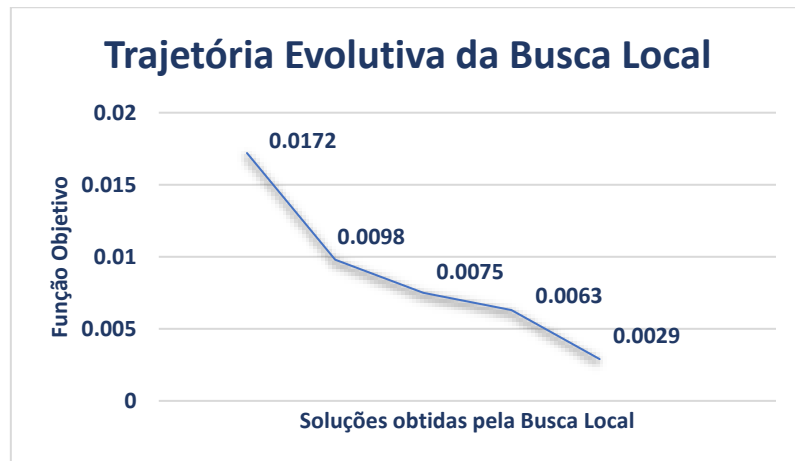
Partindo da melhor solução, em destaque, inicia-se como solução inicial para a etapa de busca local do método de otimização com o intuito de melhorar o resultado encontrado. A Tabela 22 representa os 5 melhores resultados, correspondentes as possíveis soluções para o problema em questão.

Tabela 22: Resultados obtidos pelo método de busca local - VNS.

Trecho	Distancia (%)	F.Obj
30 - 31	100	0.0172
30 - 31	81	0.0063
30 - 31	83	0.0075
30 - 31	<b>75</b>	<b>0.0029</b>
30 - 31	53	0.0098

A Figura 27 representa o processo evolutivo da solução inicial após as sucessivas otimizações.

Figura 25: Trajetória evolutiva da Busca Local.



Assim como na rede de 33 barras, foram simulados mais dois cenários de testes, cuja representação é indicada pelas Tabelas 23 e 24.

Tabela 23: Cenário de teste 5.

Trecho	% Distância	Tipo de Curto	Z defeito ( $\Omega$ )
14 - 15	27 %	Trifásico	5

Tabela 24: Cenário de teste 6.

Trecho	% Distância	Tipo de Curto	Z defeito ( $\Omega$ )
14 - 15	27 %	Trifásico	5

As Tabelas 25 e 26 contêm os resultados obtidos para os cenários de teste 5 e 6, respectivamente.

Tabela 25: Resultados do teste 5 - Rede de 70 Barras

Possível Solução	Condição de falta			Função Objetivo
	Tipo de Falta	Trecho/Distância	Zdefeito	
1	Trifásica	14 – 95,58%	12,29	0,0450
2	Trifásica	14 – 95,84%	8,98	0,0511

Solução de simetria	Trifásica	33 – 19,57%	10,92	0,0523
---------------------	-----------	-------------	-------	--------

Tabela 26: Resultados do teste 6 - Rede de 70 Barras.

Possível Solução	Condição de falta			Função Objetivo
	Tipo de Falta	Trecho/Distância	Zdefeito	
1	Monofásica	19 – 33,65%	7,01	0,0419
2	Monofásica	19 – 32,36%	14,86	0,0415
Solução de simetria	Monofásica	36 – 28,65%	8,62	0,0452

Assim como na rede de 33 barras, os dois cenários apresentados nas tabelas 25 e 26 ilustram possíveis soluções de locais de ocorrência da falta elétrica. Contudo, é possível observar que a metodologia encontrou os trechos procurados e também trechos distantes do trecho da falta, isso se deve ao fato da simetria da rede em análise, característica de sistemas radiais.

## 7. CONCLUSÃO

Neste trabalho, é possível compreender os conceitos sobre QEE e os procedimentos para se reestabelecer a energia elétrica em caso de ocorrência de interrupções por falta elétrica.

Dos resultados obtidos, depreende-se que as metodologias encontraram os locais procurados, sendo que em alguns casos, foram encontradas condições simétricas, as quais precisam ser estudadas com a finalidade de melhorar a precisão da metodologia. Outro ponto importante a ser destacado é para o tempo de processamento para redes de grande porte, onde apesar de ser esperado um tempo de execução maior, em alguns casos o algoritmo entra em loop, sendo necessária uma nova simulação de teste.

Apesar destas limitações, pode-se concluir que o trabalho apresenta grandes vantagens para se utilizar a técnica na tratativa do problema de localização de faltas, sendo também passível de possíveis melhorias como por exemplo inserção dos equipamentos de proteção, controle e supervisão na sua modelagem para que assim, se aproxime ainda mais de um caso real e alcance com melhor precisão o objetivo proposto.

## 8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CHEN, Kunjin ; HUANG, Caowei ; HE, Jinliang . **Fault detection, classification and location for transmission lines and distribution systems: a review on the methods.** IEE, 2015.

CAVALCANTE, Paulo A.H Cavalcante; ALMEIDA, Madson C. de Almeida. **Fault location approach for distribution systems based on modern monitoring infrastructure.** IEE, 2017.

J. T. A. Vianna, L. R. Araujo and D. R. R. Penido, "**High Impedance Fault Area Location in Distribution Systems Based on Current Zero Sequence Component,**" in *IEEE Latin America Transactions*, vol. 14, no. 2, pp. 759-766, Feb. 2016.

R. Krishnathevar and E. E. Ngu, "**Generalized Impedance-Based Fault Location for Distribution Systems,**" in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 27, no. 1, pp. 449-451, Jan. 2012.

Y. Gong and A. Guzmán, "**Integrated Fault Location System for Power Distribution Feeders,**" in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 49, no. 3

A. A. P. Bísaro, R. A. F. Pereira, M. Kezunovic and J. R. S. Mantovani, "**Integrated Fault Location and Power-Quality Analysis in Electric Power Distribution Systems,**" in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 31, no. 2, pp. 428-436, April 2016.

S. F. Alwash, V. K. Ramachandramurthy and N. Mithulananthan, "**Fault-Location Scheme for Power Distribution System with Distributed Generation,**" in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 30, no. 3, pp. 1187-1195, June 2015.

F. C. L. Trindade and W. Freitas, "**Low Voltage Zones to Support Fault Location in Distribution Systems With Smart Meters,**" in *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 8, no. 6, pp. 2765-2774

PEREIRA, Rodrigo Aparecido Fernandes. **Localização de faltas em alimentadores de distribuição de energia elétrica usando medições esparsas de tensões.** 2007. 131 f. Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2007. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/100372>>.

LEITE, Marino Piazza. **Identificação e Localização de Faltas de Alta Impedância Utilizando Medidores Inteligentes.** 2017. 108 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2017.

ABRAADE. **Redes de Energia Elétrica**, 2015. Disponível em:  
< <http://www.abradee.com.br/setor-eletrico/redes-de-energia-eletrica> >.

KAGAN N.; OLIVEIRA C.; ROBBA E. **Introdução aos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica.** 2ª Edição. São Paulo, Brasil: Editora Blucher, 2010. 328 p.

MONTICELLI, A. J. **Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica.** Editora Edgard Blücher Ltda. 1983.

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

STEVENSON, W. D. J. **Elementos de Análise de Sistemas de Potência.** 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986. 458 p.

SATO, Fujio; FREITAS, Walmir. **Análise de curto circuito e princípios de proteção em sistemas de energia elétrica.** 1. ed. [S.l.]: Elsevier, 2015. 455 p

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



CEMIG. **Proteção de Sobrecorrentes do Sistema de Distribuição de Médias Tensão da CEMIG**, 2017. Disponível em:

<[https://www.cemig.com.br/pt-br/atendimento/Clientes/Documents/nd\\_4\\_15\\_000001p.pdf](https://www.cemig.com.br/pt-br/atendimento/Clientes/Documents/nd_4_15_000001p.pdf)>.

CAPARÓ, J.L.C. **Modelagem de transformadores de distribuição para aplicação em algoritmos de fluxo de potência trifásico**. 2005. 132 p. Dissertação (Mestrado)- UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA, Ilha Solteira, 2005.

ZVIETCOVICH, Wilington. **Estimador de variações de tensão de curta duração em sistemas elétricos de potência utilizando estratégias evolutivas**. São Paulo, 2011. 156 p. - À Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

SHIRMOHAMMADI, D.; HONG, H. W. **Reconfiguration of electric distribution networks for resistive line losses reduction**. *IEEE Transactions on Power Delivery*, New York, v. 4, n. 2, p. 1492–1498, abr. 1989.

FREITAS, Paulo. **Localização de Falhas em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica Utilizando Otimização por Nuvens de Partículas e Busca em Vizinhança Variável**. João Monlevade, 2017. 95 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica) - UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO.

BLUM, C. and ROLI, A. (2003) **Metaheuristics in Combinatorial Optimization: Overview and Conceptual Comparison**. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 35, 268-308.

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

POSSAGNOLO, Leonardo Henrique Faria Macedo. **Reconfiguração de sistemas de distribuição operando em vários níveis de demanda através de uma meta-heurística de busca em vizinhança variável**. 2015. 184 f. Dissertação (mestrado) -

Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Engenharia, 2015

Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional** – PRODIST, Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica, Revisão 12, vigente a partir de 01/01/2021

Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. **Manual de Controle Patrimonial do Setor Elétrico - MCPSE**, Brasília, 11 ago. 2015.

## 7. ANEXOS

### 7.1. ANEXO A – REDE DE 33 BARRAS

Barras	P (kW)	Q (kVar)	Linhas			
			Envio	Receptora	R ( $\Omega$ )	X ( $\Omega$ )
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

<b>22</b>	<b>90</b>	<b>40</b>	<b>21</b>	<b>22</b>	<b>0,7089</b>	<b>0,9373</b>
<b>23</b>	<b>90</b>	<b>50</b>	<b>3</b>	<b>23</b>	<b>0,4512</b>	<b>0,3083</b>
<b>24</b>	<b>420</b>	<b>200</b>	<b>23</b>	<b>24</b>	<b>0,898</b>	<b>0,7091</b>
<b>25</b>	<b>420</b>	<b>200</b>	<b>24</b>	<b>25</b>	<b>0,896</b>	<b>0,7011</b>
<b>26</b>	<b>60</b>	<b>25</b>	<b>6</b>	<b>26</b>	<b>0,203</b>	<b>0,1034</b>
<b>27</b>	<b>60</b>	<b>25</b>	<b>26</b>	<b>27</b>	<b>0,2842</b>	<b>0,1447</b>
<b>28</b>	<b>60</b>	<b>20</b>	<b>27</b>	<b>28</b>	<b>1,059</b>	<b>0,9337</b>
<b>29</b>	<b>120</b>	<b>70</b>	<b>28</b>	<b>29</b>	<b>0,8042</b>	<b>0,7006</b>
<b>30</b>	<b>200</b>	<b>600</b>	<b>29</b>	<b>30</b>	<b>0,5075</b>	<b>0,2585</b>
<b>31</b>	<b>150</b>	<b>70</b>	<b>30</b>	<b>31</b>	<b>0,9744</b>	<b>0,963</b>
<b>32</b>	<b>210</b>	<b>100</b>	<b>31</b>	<b>32</b>	<b>0,3105</b>	<b>0,3619</b>
<b>33</b>	<b>60</b>	<b>40</b>	<b>32</b>	<b>33</b>	<b>0,341</b>	<b>0,5302</b>

## 7.2. ANEXO B – REDE DE 70 BARRAS

Barras	P (kW)	Q (kVar)	Linhas			
			Envio	Receptora	R ( )	X ( )
1	0	0	Envio	Receptora	R ( )	X ( )
2	0	0	1	2	0,005	0,0012
3	0	0	2	3	0,005	0,0012
4	0	0	3	4	0,0015	0,0036
5	0	0	4	5	0,0251	0,0294
6	2,6	2,2	5	6	0,366	0,1864
7	40,4	30	6	7	0,3811	0,1941
8	75	54	7	8	0,0922	0,047
9	30	22	8	9	0,0493	0,0251
10	28	19	9	10	0,819	0,2707
11	145	104	10	11	0,1872	0,0619
12	145	104	11	12	0,7114	0,2351
13	8	5	12	13	1,03	0,34
14	8	5,5	13	14	1,044	0,345
15	0	0	14	15	1,058	0,3496
16	45,5	30	15	16	0,1966	0,065
17	60	35	16	17	0,3744	0,1238
18	60	35	17	18	0,0047	0,0016
19	0	0	18	19	0,3276	0,1083
20	1	0,6	19	20	0,2106	0,069
21	114	81	20	21	0,3416	0,1129
22	5	3,5	21	22	0,014	0,0046

23	0	0	22	23	0,1591	0,0526
24	28	20	23	24	0,3463	0,1145
25	0	0	24	25	0,7488	0,2475
26	14	10	25	26	0,3089	0,1021
27	14	10	26	27	0,1732	0,0572
28	26	18,6	27	28	0,0044	0,0108
29	26	18,6	3	29	0,064	0,1565
30	0	0	29	30	0,3978	0,1315
31	0	0	30	31	0,0702	0,0232
32	0	0	31	32	0,351	0,116
33	14	10	32	33	0,839	0,2816
34	9,5	14	33	34	1,708	0,5646
35	6	4	34	35	1,474	0,4873
36	26	18,55	35	36	0,0044	0,0108
37	26	18,55	3	37	0,064	0,1565
38	0	0	37	38	0,1053	0,123
39	24	17	38	39	0,0304	0,0355
40	24	17	39	40	0,0018	0,0021
41	1,2	1	40	41	0,7283	0,8509
42	0	0	41	42	0,31	0,3623
43	6	4,3	42	43	0,041	0,0478
44	0	0	43	44	0,0092	0,0116
45	39,22	26,3	44	45	0,1089	0,1373
46	39,22	26,3	45	46	0,0009	0,0012
47	0	0	46	47	0,0034	0,0084

48	79	56,4	5	48	0,0851	0,2083
49	384,7	274,5	48	49	0,2898	0,7091
50	384,7	274,5	49	50	0,0822	0,2011
51	40,5	28,3	50	51	0,0928	0,0473
52	3,6	2,7	9	52	0,3319	0,1114
53	4,35	3,5	52	53	0,174	0,0886
54	26,4	19	10	54	0,203	0,1034
55	24	17,2	54	55	0,2842	0,1447
56	0	0	55	56	0,2813	0,1433
57	0	0	56	57	1,59	0,5337
58	0	0	57	58	0,7837	0,263
59	100	72	58	59	0,3042	0,1006
60	0	0	59	60	0,3861	0,1172
61	1244	888	60	61	0,5075	0,2585
62	32	23	61	62	0,0974	0,0496
63	0	0	62	63	0,145	0,0738
64	227	162	63	64	0,7105	0,3619
65	59	42	64	65	1,041	0,5302
66	18	13	65	66	0,2012	0,0611
67	18	13	12	67	0,0047	0,0014
68	28	20	67	68	0,7394	0,244
69	28	20	13	69	0,0047	0,0016
70	33	27	69	70	0,0047	0,0016