

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DE MATO GROSSO**  
**FACULDADE DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS**  
**CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**CARLOS HENRIQUE BENDLER BALBINOTTI**

**PROPOSTA DE ALOCAÇÃO OTIMIZADA DE PMUs PARA  
LOCALIZAÇÃO DE FALTAS NA REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

**UNEMAT – Campus de Sinop**

**2017/2**

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DE MATO GROSSO**  
**FACULDADE DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS**  
**CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**CARLOS HENRIQUE BENDLER BALBINOTTI**

**PROPOSTA DE ALOCAÇÃO OTIMIZADA DE PMUs PARA  
LOCALIZAÇÃO DE FALTAS NA REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Banca Examinadora do Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica – UNEMAT, Campus Universitário de Sinop – MT, como pré-requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Prof. Orientador: Msc. Rogério Lúcio Lima

Co-orientador: Dr. André do Amaral Penteado Bísaro.

**UNEMAT – Campus de Sinop**

**2017/2**

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus que me guiou até aqui, pelas graças concedidas e por colocar as pessoas certas para me ajudar a concluir esse trabalho.

Agradeço aos meus pais que me incentivaram e me apoiaram durante o curso todo, acreditando em mim e compreendendo muitas vezes as minhas faltas em casa.

Agradeço aos professores Rogério Lucio Lima e André do Amaral Penteado Bísvaro pela dedicação e apoio, me orientando da melhor maneira possível e incentivando sempre a dar o melhor de mim.

Agradeço aos colegas e amigos que me ajudaram a programar, escrever e formatar o texto, pois escrever para mim sempre foi difícil.

Agradeço aos demais professores da UNEMAT que fizeram possível minha formação como engenheiro eletricista.

## RESUMO

Este trabalho traz uma proposta de alocação otimizadas de PMUs (unidade medidora de fasores), utilizando a metaheurística Algoritmo Genético para fazer a alocação dos medidores, buscando melhorar a eficiência da atuação dos medidores esparsos de tensão, redução de custos de implementação e tempo para a retomada do fornecimento de energia elétrica no caso de faltas na rede.

Para encontrar as faltas simuladas na rede, utiliza-se o algoritmo de localização de faltas que trabalha com os dados coletados pelos medidores ao longo da rede, todos as simulações foram implementadas por meio do software Alternative Transients Program (ATP).

Os resultados foram confeccionados a partir de um alimentador real de distribuição trifásico predominantemente radial de 134 barras, com tensão 13,8 kV e potência nominal de 7,065 MVA. Os resultados encontrados foram satisfatórios e comprovaram a eficiência do Algoritmo Genético na alocação dos PMUs, e que essa alocação otimizada melhora o funcionamento dos medidores esparsos.

**Palavras chaves:** PMUs - Otimização - Algoritmo Genético - Localização de faltas

## ABSTRACT

This work brings a proposal of optimized allocation of PMUs (Phasor Measurement Unit), using metaheurística genetic algorithm to do the allocating of the meters, seeking to improve the efficiency of the performance of the sparse voltage meters, reducing costs and implementation end time for the resumption of power supply in case of faults in the network.

To find the faults simulated on the network, use the faults location algorithm that works with the data collected by meters along the network, all the simulations were implemented through software Alternative Transients Program (ATP).

The results were made from a real three-phase distribution feeder predominantly radial bricks, with 134 bars 13.8 kV voltage and rated power of 7.065 MVA. Results were satisfactory and proved the efficiency of genetic algorithm on PMUs allocation, and this optimized allocation improves the functioning of the sparse meters.

**Key words:** PMUs – optimization - genetic algorithm - faults location

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                                          |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1: Composição Probabilística entre os tipos de faltas e composição das mesmas.....                                                | 19 |
| Tabela 2: Relação de barras em falta para uma falta simulada na barra 98, fase A, com resistencia de falta fase-terra de 41,87 ohms..... | 31 |
| Tabela 3 Faltas testadas para a presente configuração de medidores. ....                                                                 | 35 |
| Tabela 4 Tabela apontando a posição encontrada pelo algoritmo para a falta na barra 68.....                                              | 38 |
| Tabela 5 Tabela apontando a posição encontrada pelo algoritmo para a falta na barra 128.....                                             | 39 |
| Tabela 6 Tabela apontando a posição encontrada pelo algoritmo para a falta na barra 28.....                                              | 41 |

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                 |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1: Ilustração de uma rede de distribuição primária e secundária. ....                                                                    | 14 |
| Figura 2: Representação gráfica de um Afundamento de tensão. ....                                                                               | 17 |
| Figura 3: Representação gráfica da Elevação de Tensão.....                                                                                      | 17 |
| Figura 4: Estrutura do sistema localizador de faltas.....                                                                                       | 21 |
| Figura 5: Diagrama de blocos do algoritmo de localização de faltas.....                                                                         | 23 |
| Figura 6: Fluxograma do Algoritmo Genético utilizado neste trabalho. ....                                                                       | 27 |
| Figura 7: Sistema de distribuição real trifásico 134 barras 13,8 kV, 7,065 MVA. . <b>Erro! Indicador não definido.</b>                          |    |
| Figura 8: Histograma das resistências de falta fase-terra e entre fases..... <b>Erro! Indicador não definido.</b>                               |    |
| Figura 9 Fluxograma para calcular a função objetivo. ....                                                                                       | 33 |
| Figura 10 Exemplo de recombinação .....                                                                                                         | 34 |
| Figura 11 Modelo do sistema com os medidores posicionados .....                                                                                 | 38 |
| Figura 12 Sitema mostrando a região encontrada pelo algoritmo localizador de faltas como sendo região faltosa para uma falta na barra 68 .....  | 39 |
| Figura 13 Sitema mostrando a região encontrada pelo algoritmo localizador de faltas como sendo região faltosa para uma falta na barra 128 ..... | 41 |
| Figura 14 Sitema mostrando a região encontrada pelo algoritmo localizador de faltas como sendo região faltosa para uma falta na barra 28 .....  | 42 |

## LISTA DE ABREVIATURAS

AG – Algoritmo Genético.

ATP – Alternative Transients Program.

DIC – Duração de Interrupção por Unidade Consumidora.

FIC – Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora.

DMIC – Duração Máxima de Interrupção Contínua por Unidade Consumidora.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica.

PMU – Phasor Measurement Unit. (unidade medidora de fasores).

GRASP – Greedy Randomized Adaptive Search.

WAMS – Wide Area Monitoring System.

IEEE – Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos.

ETD – Estações Transformadoras de Distribuição.

IEC – International Electrotechnical Commission.

ONS – Operador Nacional do Sistema.

VTCD – Variações de Tensão de Curta Duração.

EMT – Elevação Momentânea de Tensão.

FO – Função Objetivo.

kV – Quilo Volt



## SUMÁRIO

|                                                                                              |            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>AGRADECIMENTOS .....</b>                                                                  | <b>I</b>   |
| <b>RESUMO.....</b>                                                                           | <b>II</b>  |
| <b>ABSTRACT.....</b>                                                                         | <b>III</b> |
| <b>LISTA DE TABELAS .....</b>                                                                | <b>IV</b>  |
| <b>LISTA DE FIGURAS .....</b>                                                                | <b>V</b>   |
| <b>LISTA DE ABREVIATURAS.....</b>                                                            | <b>VI</b>  |
| <b>1 INTRODUÇÃO .....</b>                                                                    | <b>8</b>   |
| 1.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE O TEMA.....                                                  | 10         |
| 1.2 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO .....                                                               | 11         |
| <b>2 METODOLOGIA</b>                                                                         |            |
| ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.                                                                |            |
| 2.1 REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA .....                                          | 13         |
| 2.1.1 Níveis de Tensão da Distribuição de Energia Elétrica .....                             | 13         |
| 2.1.2 Afundamento de tensão .....                                                            | 15         |
| 2.1.3 Elevação de Tensão .....                                                               | 17         |
| 2.2 CURTO CIRCUITOS.....                                                                     | 18         |
| 2.3 ALOCAÇÃO DOS MEDIDORES DE TENSÃO EM ALIMENTADORES<br>RADIAIS AÉREOS DE DISTRIBUIÇÃO..... | 19         |
| 2.3.1 Localização das Falhas em Alimentadores Radiais de Distribuição<br>20                  |            |
| 2.4 ALGORITMO GENÉTICO .....                                                                 | 23         |
| 2.4.1 Componentes do Algoritmo Genético: .....                                               | 24         |
| 2.5 SOFTWARES UTILIZADOS .....                                                               | 27         |
| <b>3 ANÁLISE E DISCUSSÕES DOS RESULTADOS .....</b>                                           | <b>29</b>  |
| 3.1 METODOLOGIA .....                                                                        | 29         |
| 3.2 SISTEMA ELÉTRICO A SER ESTUDADO .....                                                    | 34         |
| 3.3 RESULTADO ENCONTRADO .....                                                               | 35         |
| <b>4 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....</b>                                                 | <b>44</b>  |
| 4.1 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....                                                      | 44         |
| <b>5 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....</b>                                                       | <b>46</b>  |
| <b>6 APÊNDICE A – DADOS DO ALIMENTADOR.....</b>                                              | <b>48</b>  |

## 1 INTRODUÇÃO

Diante da topologia complexa atual das redes de energia elétrica e o crescente aumento de cargas a ela agregada culminam em vários problemas indesejáveis, tais como as faltas, muitas vezes causadas por acidentes naturais e/ou sobrecargas. Localizar tais faltas nestes arranjos complexos é uma tarefa desafiadora e tem sido preocupação dos engenheiros e pesquisadores ao longo do tempo.

Essas faltas podem causar inúmeros prejuízos aos usuários e as concessionárias de energia. Aos consumidores, além da interrupção do fornecimento de energia elétrica, pode-se ter desde a danificação de equipamentos à interrupção de produção industrial. Para as concessionárias, essas faltas geram multas por interrupção no fornecimento, além de prejuízos materiais, como a substituição de equipamentos elétricos utilizados nas redes de distribuição de energia elétrica.

De acordo com ANEEL (2013), consumidores de energia elétrica receberam R\$ 437,8 milhões em compensação por interrupções no fornecimento de energia elétrica em 2012. O valor foi maior que o registrado em 2011, quando os consumidores do país receberam R\$ 397,2 milhões. Foram pagas 98,7 milhões de compensações pelo descumprimento dos indicadores individuais de Duração de Interrupção por Unidade Consumidora (DIC), Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (FIC) e Duração Máxima de Interrupção Contínua por Unidade Consumidora (DMIC). A quantidade de compensações não é necessariamente igual ao número de consumidores compensados, uma vez que um mesmo consumidor pode ser compensado mais de uma vez no ano.

De fato, as faltas e interrupções, no fornecimento são inevitáveis, mas podem ser amenizadas por métodos de otimização que apresentam estratégias de como podem viabilizar a retomada do fornecimento de energia elétrica em um intervalo de tempo reduzido.

A localização de faltas em sistemas de distribuição é um desafio, para as equipes de manutenção, sempre presente nas redes elétricas complexas ou não e por isso carece de investigações. Os motivos das faltas são bem diversos tal como a colisão de um carro com um poste ou uma árvore que cai sobre os fios da rede.

Atualmente existem inúmeros estudos do assunto, principalmente no que se refere a otimização de sistemas de monitoramento. Por serem equipamentos caros, quanto menos equipamentos utilizarmos, maior a viabilidade econômica do

empreendimento. Neste trabalho, pretende-se apresentar uma proposta de alocação otimizada desses equipamentos em uma rede radial real de distribuição de energia elétrica.

As análises do estado da rede serão realizadas no software *Alternative Transients Program* (ATP)( COMITE ARGENTINO DE USUÁRIOS DEL EMTP/ATP,2002), no qual será simulada a rede com base nos dados adquiridos da concessionária de distribuição de energia, e para alocar os medidores nos pontos otimizado, pretende-se implementar o algoritmo genético (AG) no ambiente MATLAB (MathWorks,2011).

Com os resultados gerados pelos algoritmos de localização de faltas será possível enviar equipes de manutenção aos locais das faltas ou região faltosa.

Atualmente as concessionárias utilizam o método de triangulação das ligações e reclamações dos clientes quando da existência da falta de energia e/ou oscilações da energia. Dependendo da região das ligações, pode-se determinar a região da falta. Também utilizam os religadores e relés instalados na rede. Esse procedimento tem um certo tempo de atraso, o que aumenta os prejuízos gerados.

Devido a estas questões levantadas, os resultados deste estudo permitem diminuir esse tempo sem o fornecimento de energia?

O objetivo desse trabalho é encontrar a melhor solução na alocação de medidores de tensão com o intuito de localizar faltas na rede de distribuição de energia elétrica o mais precisamente possível utilizando a menor quantidade possível de medidores de tensão, e assim agilizar a retomada do fornecimento de energia elétrica e evitar prejuízos tanto para os consumidores e concessionárias.

Utilizando o Algoritmo Genético para a otimização do sistema de medição, pretende-se otimizar a área de busca das equipes de manutenção das distribuidoras e levar a equipe o mais próximo da falta, tendo em vista a inviabilidade econômica de se instalar um medidor a cada poste da rede, e busca-se aqui uma solução com poucos medidores e, conseqüente, diminuição nos custos de implantação desse monitoramento.

Por final, pretende-se com os resultados deste trabalho, diminuir o tempo de interrupção no fornecimento de energia e a do trabalho das equipes de manutenção, além da melhoria da qualidade da energia elétrica.

## 1.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE O TEMA

Durante a revisão literária do assunto, foi dado destaque aos trabalhos relacionados à localização de faltas na rede, nos quais, alguns discutiam sobre a utilização de algoritmos de busca com base nos dados retirados dos PMUs, alguns modelos de medidores desenvolvidos e outros definiam a importância da prevenção dessas faltas.

Bíscaro (2009) propõe a localização ótima de *Phasor Measurement Unit* (PMUs) na localização de faltas e o monitoramento de tensão em alimentadores radiais de distribuição de energia elétrica, na locação dos PMUs utilizou-se o Algoritmo GRASP (Greedy Randomized Adaptive Search), e para a modelagem da rede utilizou o Software ATP.

Este trabalho apresenta resultados de testes realizados num alimentador de 134 barras, e tensão 13,8 kV. Em seguida, faz-se a comparação com o método empregado em Pereira (2004). O método empregado em Bíscaro (2009) apresentou menor erro ao localizar a barra faltosa. Além disso, o trabalho obteve resultados bem satisfatórios para um alimentador de 3287 barras e tensão de 11,4 kV.

Em Huang et al. (2014) os autores propuseram um sistema de alocação otimizada de PMUs utilizando o Algoritmo Genético, utilizando para testes um alimentador do IEEE com 39 barras (IEEE-39). Primeiramente o algoritmo calculou a disponibilidade de PMU usando cadeias de Markov, em seguida, a fim de encontrar a implantação ideal do PMU, a influência da falha do PMU é analisada pelos índices de avaliação da confiabilidade do WAMS (*Wide Area Monitoring System*) que são baseadas na nova tecnologia de aquisição de dados de medição fasorial. Estes índices permitem monitorar as condições do sistema de transmissão em grandes áreas com vista à detecção e posterior neutralização das instabilidades da rede. Finalmente foram analisadas as atividades não estimadas do sistema primário causadas pela falha do PMU.

Em Allagui.et.al (2012), os autores apresentam um programa desenvolvido e implementado no ambiente MATLAB baseado no algoritmo genético para a alocação ótima dos PMUs. O algoritmo foi testado em três sistemas de teste do IEEE, sendo

elas a de 14 barras, de 30 barras e de 118 barras, e os resultados obtidos indicam várias soluções de alocação dos PMUs em cada uma das situações. Concluíram que a alocação otimizada dos PMUs em uma rede de distribuição real deve garantir a melhor observabilidade da rede com a menor quantidade de PMUs possível para garantir uma boa coleta de dados por parte dos medidores e assim conseguir um bom rendimento do algoritmo localizador de faltas.

Em Saidelles (2013), tem-se o desenvolvimento de um Sistema de Monitoramento Automático de Falhas em Transformadores de Redes de Distribuição de Energia Elétrica, que concentra os dados coletados e as estatísticas de interrupções de fornecimento permanentes e temporárias num servidor *Web*. Por meio desses dados é possível encontrar as faltas na rede e fazer o monitoramento em tempo real. Montou-se em topologia mesh, utilizando dispositivos baseados na tecnologia ZigBee, o trabalho propôs a criação de um protótipo de aquisição dos dados da rede e a criação de uma página *web* onde todos esses dados serão armazenados.

## 1.2 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Este trabalho está organizado em cinco capítulos. No primeiro capítulo encontra-se a introdução e descrição do problema da localização de faltas em alimentadores radiais de distribuição de energia elétrica, descreve-se a importância da otimização desse sistema de medições, os objetivos deste trabalho e a revisão bibliográfica do assunto.

O Capítulo 2 apresenta a rede de distribuição radial, o algoritmo de localização de faltas em que se baseia para a função objetivo do Algoritmo Genético.

O Capítulo 3 traz os conceitos básicos da metaheurística Algoritmo Genético CAMARGO (2014, p. 53), e explica seu funcionamento, aqui também apresentamos a topologia da rede estudada e algumas características dela, falamos também dos *softwares* em que as análises foram feitas.

O Capítulo 4 apresenta os testes e sua implementação, os resultados obtidos para a alocação ótima dos medidores de tensão no alimentador e algumas tabelas que demonstram o desempenho do algoritmo no estudo.

No Capítulo 5 são discutidos os resultados dos testes e apresentados as considerações sobre as melhorias que a solução apresentada pelo algoritmo apresenta com a alocação dos medidores de tensão, comentários e os trabalhos futuros.

No Apêndice A encontra-se os dados do alimentador de distribuição radial em 13,8 kV e 134 barras, que foram utilizados para os nos testes deste trabalho.

## **2 REDES, ALGORITMOS E SOFTWARES.**

Neste capítulo será discutido sobre as características das redes de distribuição radial e as possíveis faltas encontradas, será abordado também o algoritmo de localização de faltas e alocação dos medidores na rede, o Algoritmo Genético, sistema estudado e softwares utilizados.

### **2.1 REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

As Estações Transformadoras de Distribuição (ETD) constituem as subestações que rebaixam os níveis de tensão para que seja fornecida aos consumidores.

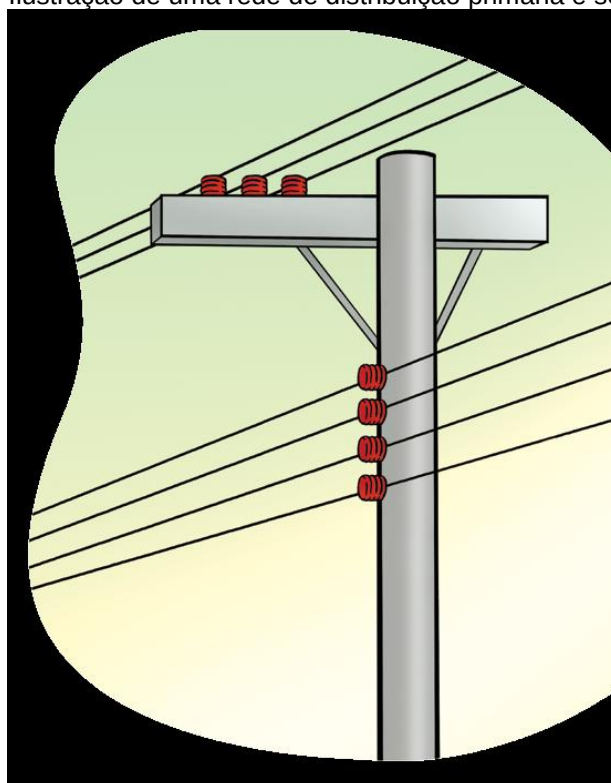
Embora o nível de tensão seja reduzido ainda não é adequado ao consumo de energia, imediato pela maioria dos consumidores. Por isso, em geral, são utilizados transformadores instalados nos postes para adequar os níveis de tensão disponibilizado aos consumidores em geral.

Assim como nas redes de transmissão, o sistema de distribuição de energia elétrica também é composto por cabos condutores, transformadores e equipamentos diversos de fixação e isolação, controle e proteção dos circuitos de distribuição. Entretanto, o sistema de distribuição de energia elétrica se difere ao de transmissão devido sua extensão e ramificação, tendo em vista a necessidade de atender de forma abrangente todos os consumidores. Gedra et al. (2014).

#### **2.1.1 Níveis de Tensão da Distribuição de Energia Elétrica**

Os níveis de tensão encontrado nas redes primarias de distribuição variam entre 2,3 kV a 44 kV, e as redes secundarias variam de 110 V a 440 V, dependendo da situação em que a rede se encontra e a necessidade do consumidor Gedra et al. (2014). Na Figura 1 podemos observar uma ilustração de como é uma rede de distribuição de energia elétrica primaria e secundaria.

Figura 1: Ilustração de uma rede de distribuição primária e secundária.



Fonte. Gedra et al. (2014)

Os valores de tensão nas redes de energia elétrica primária existentes no Brasil são variados, isso depende da região geográfica, dentre os valores mais comumente encontrados tem-se: 11,9 kV, 13,2 kV, 13,8 kV, 20 kV, 34,5 kV. Dentre os valores encontrados nas redes secundárias tem-se: 380 V, 230 V, 220 V, 127 V, 115 V e 110 V.

Quanto aos tipos de redes de distribuição de energia elétrica Segundo Gedra et al. (2014) as redes de distribuição podem ser divididas em quatro tipos distintos; sendo elas:

Rede de Distribuição Aérea Convencional: É constituída de condutores nus ou condutores revestidos fixados em isoladores apoiados sobre cruzetas metálicas, de madeira ou de material sintético. Esse tipo de rede é mais susceptível à ocorrência de defeitos, principalmente quando há contato de galhos de árvores com os condutores elétricos ou danos impostos pela queda de árvores durante as tempestades ou abaloamento de postes provocados por veículos.

Rede Distribuição Aérea Compacta: Este tipo surgiu na década de 1990, cujos condutores das redes compactas apresentam uma camada de isolamento. Devido à sua



característica de construção, ocupa menor espaço e sofre um menor número de perturbações, advindas de ventos ou galhos de árvores.

Rede de Distribuição Aérea Isolada: Constitui o tipo de rede aérea bastante protegida, pois os condutores são dotados de isolamento, o que permite serem trançados. Geralmente mais cara, este tipo de rede é utilizado em condições especiais.

Rede de Distribuição Subterrânea: Como todos os componentes são instalados sob o solo, a rede subterrânea é aquela que proporciona o maior nível de confiabilidade e, também, o melhor resultado estético. No entanto, as redes subterrâneas são bem mais caras que as demais, tendo em vista as características de isolamento e estanqueidade que devem ser apresentadas por seus componentes. Estes tipos são utilizados em regiões muito densas ou onde há restrições a instalação das redes aéreas.

Nesse trabalho pretende-se estudar uma rede de distribuição aérea mista em rede compacta e convencional com um alimentador da cidade Sorriso – MT. Este possui uma diversidade de clientes, desde pequenas empresas, área urbana e área rural.

### **2.1.2 Afundamento de tensão**

O afundamento de tensão é quando o valor eficaz da tensão cai por um curto período de tempo, logo após o valor da tensão se reestabelece. O afundamento de tensão tem as seguintes definições: Gedra et al. (2014)

Segundo o Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) por meio da norma IEEE Std 1159-1995 o afundamento de tensão é definido como “um decréscimo entre 0,1 e 0,9 pu do valor eficaz da tensão nominal, com duração entre 0,5 ciclo e 1 minuto”. Segundo essa norma, um afundamento de tensão com intensidade menor do que 0,1 pu é considerado interrupção.

Já a International Electrotechnical Commission (IEC) por meio da qual define afundamento de tensão como “uma redução súbita da tensão de um ponto do sistema elétrico, seguido de seu restabelecimento após um curto período de tempo, de 0,5 ciclo a uns poucos segundos”.

Para o Operador Nacional do Sistema (ONS), no Brasil, nos procedimentos de rede elaborados pelo ONS, submódulo 2.8, Gerenciamento dos Indicadores de Desempenho da Rede Básica e de Seus Componentes, entre os indicadores

de avaliação da qualidade da energia elétrica, definem-se as “Variações de Tensão de Curta Duração” (VTCD), englobando os fenômenos de interrupção, afundamento e elevação de tensão.

De acordo com esses procedimentos, entende-se por variação de tensão de curta duração: “um evento aleatório de tensão caracterizado por desvio significativo, por curto intervalo de tempo, do valor eficaz da tensão”.

Para a ANEEL, o Afundamento momentâneo de tensão é um “evento em que o valor eficaz da tensão do sistema se reduz, momentaneamente, para valores abaixo de 90% da tensão nominal de operação, durante intervalo inferior a 3 segundos”.

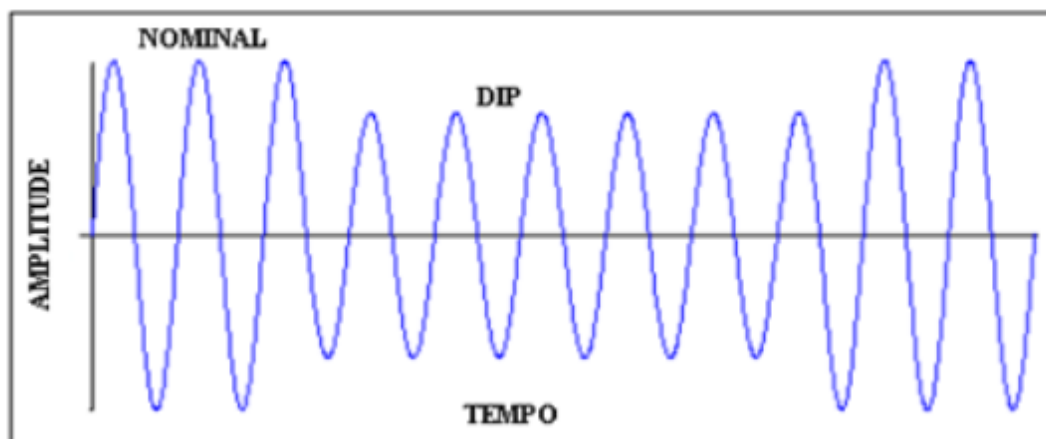
Diante dessas definições pode-se dizer que as normas relacionadas têm uma ideia bem semelhante sobre o problema de afundamento de tensão, neste trabalho será adotado como parâmetro de afundamento de tensão o descrito pelo IEEE.

Dentre os problemas causados pelo afundamento de tensão segue alguns mais conhecidos:

- Perda da programação de microprocessadores em Controladores Lógicos Programáveis (CLPs).
- Atuação indevida de relés de subtensão.
- Desligamento de lâmpadas de descarga.
- Redução da potência nos motores.
- Abertura das bobinas de contadores e relés auxiliares.

Na Figura 2 pode-se observar como fica o espectro de onda no momento do afundamento de tensão, cuja amplitude da onda apresenta uma diminuição no instante do ocorrido.

Figura 2: Representação gráfica de um Afundamento de tensão.



Fonte: (OLIVEIRA, 2009).

### 2.1.3 Elevação de Tensão

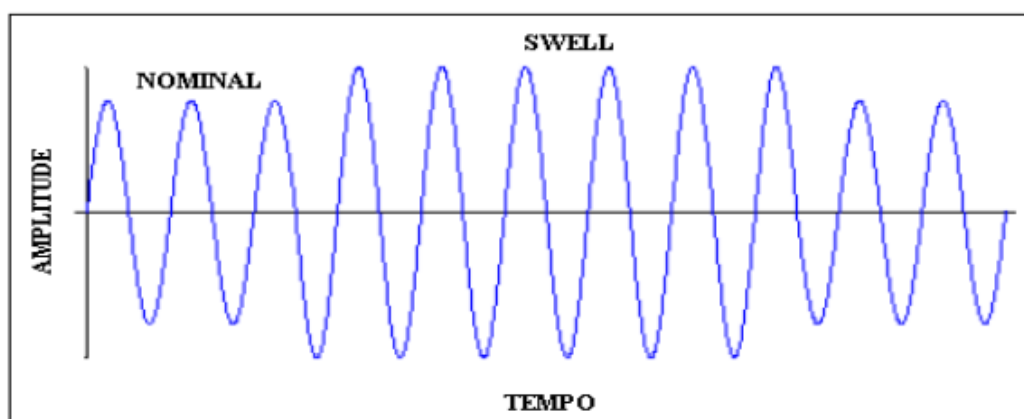
Esse distúrbio ocorre quando a tensão eficaz é superior ao seu valor nominal.

Segundo a ONS, submódulo 2.8, este fenômeno tem a seguinte definição:

Denomina-se Elevação Momentânea de Tensão (EMT) o evento em que o valor eficaz da tensão é superior a 1,1 pu da tensão nominal, durante um intervalo de tempo com duração superior ou igual a um ciclo (16,67 ms) e inferior ou igual a 3 segundos. (ONS, 2009, p.18).

Na figura 3 podemos observar o espectro de onda no momento que acontece a elevação de tensão, observe que ao contrário do afundamento a amplitude da onda aumenta no momento da elevação.

Figura 3: Representação gráfica da Elevação de Tensão.



Fonte. (OLIVEIRA, 2009).

## 2.2 CURTO CIRCUITOS

Na literatura encontra-se várias explicações de como acontece um curto circuito e seus efeitos danosos. Segundo a Schneider Electric (2016), um curto-circuito é uma ligação de baixa impedância entre dois pontos de potenciais diferentes. Essa ligação pode ser metálica quando se diz que há um curto-circuito franco ou por um arco elétrico, que é a situação mais comum; uma situação intermediária é a dos curtos causados por galhos de árvores ou outros objetos que caem sobre a linha de distribuição. Há nesse instante uma elevação repentina da corrente atingindo valores, em geral, superiores a 10 vezes a corrente nominal do circuito.

Em algumas situações, como acontece em longos circuitos de distribuição, a corrente de curto-circuito pode ter a mesma magnitude da corrente de carga, o que exige técnicas especiais para ser localizadas (são os chamados curtos-circuitos de alta impedância).

Quando a corrente se eleva, surgem esforços mecânicos entre os condutores ou entre componentes dos equipamentos (efeitos mecânicos) e eleva a temperatura dos condutores ou das partes condutoras dos equipamentos (são os chamados efeitos térmicos).

Na ocorrência dos curtos-circuitos através de arcos elétricos podem acontecer ainda explosões e incêndios. Se não existir uma atuação imediata da proteção, os outros curtos-circuitos também podem dar origem a incêndios e explosões (que às vezes são denominados efeitos explosivos).

Na maioria dos casos, os curtos-circuitos são causados por uma falha da isolamento sólida, líquida ou gasosa que sustenta a tensão entre condutores ou entre condutores e terra; pode ser também causada por uma redução da distância e choque entre os condutores (ou entre condutores e terra).

Os sistemas de distribuição estão sempre sujeitos a faltas temporárias ou permanentes. As faltas temporárias são aquelas com duração limitada ao período necessário para restabelecer o serviço através da operação automática do equipamento de proteção que interrompeu o circuito ou parte dele. Já as permanentes são todas interrupções que não são classificadas como temporárias ou não programadas.

O sistema de distribuição na maioria dos casos é trifásico, sendo assim, apresentam três tipos de faltas que são normalmente provocadas pela ação de

descargas atmosféricas, contatos de árvores e animais às partes vivas, também por falhas de equipamentos e erro humano. Essas faltas são:

- Faltas Fase-Terra: ocorre quando um ou mais cabos da rede toca o solo ou algum isolador não funciona direito, podem ser faltas permanentes ou transitórias, são as mais comuns de todas e ocasionadas por diversos fatores e são predominantes do tipo transitórias;
- Fase-Fase: esse tipo de falta acontece quando dois cabos da rede se tocam, acontecem com menor frequência, porém os efeitos são mais severos que nas faltas Fase-Terra e são predominantes faltas permanentes;
- Faltas Trifásicas: ocorrem quando os três cabos da rede se tocam, são as faltas de menor ocorrência, porém é a falta de maiores danos à rede, e na sua maioria faltas permanentes. Gedra et al. (2014)

A tabela 1 traz a porcentagem das faltas mais comuns citadas acima, e também se são transitórias ou permanentes.

Tabela 1: Composição Probabilística entre os tipos de faltas e composição das mesmas

| <b>Faltas</b>     | <b>%</b> | <b>Permanentes (%)</b> | <b>Transitórias (%)</b> |
|-------------------|----------|------------------------|-------------------------|
| <b>Fase-Terra</b> | 79       | 20                     | 80                      |
| <b>Fase-Fase</b>  | 11       | 70                     | 30                      |
| <b>Trifásicas</b> | 2        | 95                     | 5                       |
| <b>Outros</b>     | 8        | -                      | -                       |

Fonte: GIGUER, S. Proteção de sistemas de distribuição.

## 2.3 ALOCAÇÃO DOS MEDIDORES DE TENSÃO EM ALIMENTADORES RADIAIS AÉREOS DE DISTRIBUIÇÃO

A alocação otimizada de medidores de tensão na rede é oriunda da necessidade de se monitorar os níveis da tensão no sistema de distribuição de E.E. e por meio de algoritmos computacionais que faz as medições da tensão ao longo do alimentador, executa-se a localização de faltas.

No modelo matemático, para a alocação dos medidores nos alimentadores de distribuição, um algoritmo de localização de faltas é considerado uma ferramenta auxiliar para a avaliação da função objetivo do algoritmo genético (PEREIRA et. al., 2008). Este modelo tem como objetivo definir a posição onde serão instalados os medidores de tensão no alimentador, buscando estabelecer a melhor relação

custo/benefício entre os valores para implantação do sistema. Assim pode-se obter resultados com melhor qualidade e precisão para qualquer algoritmo de localização de faltas que utilize informações de afundamentos de tensão para localizar faltas na rede. Por meio do modelo matemático procura-se utilizar uma quantidade reduzida de equipamentos instalados no alimentador, dessa forma, reduzir os custos de implantação e operar com nível de confiabilidade de dados no alimentador. Os medidores devem ser instalados em ramos que proporcionam melhores resultados da localização de faltas e façam o monitoramento do nível de tensão do sistema.

O objetivo da alocação otimizada de medidores é a diminuição da distância entre o local de incidência da falta e o local encontrado pelo algoritmo de localização. Além disso, fazer o controle em tempo real das condições de magnitude de tensão em regiões preestabelecidas na rede. Este modelo foi desenvolvido com objetivo de localização de faltas em alimentadores radiais aéreos com pouco ou nenhum nível de automação, como na maioria dos sistemas de distribuição das empresas atuais brasileiras e com longos alimentadores rurais.

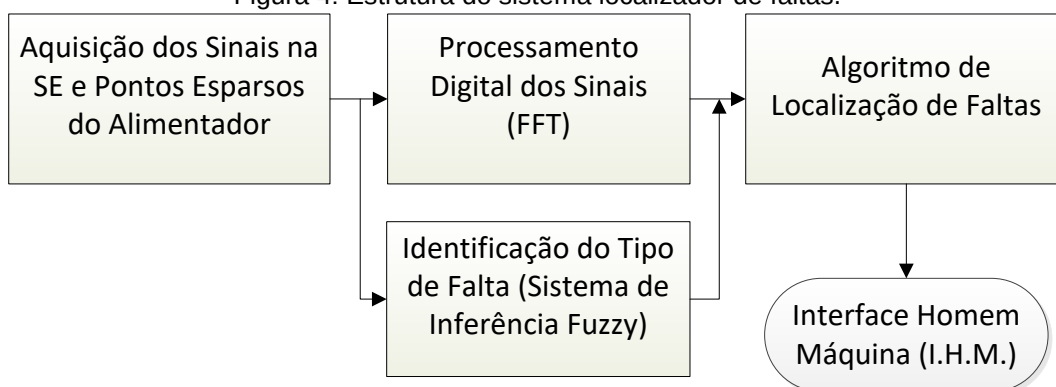
### **2.3.1 Localização das Faltas em Alimentadores Radiais de Distribuição**

A localização de faltas em redes de distribuição de energia elétrica, utiliza de instrumentação para aquisição e tratamento de sinais elétricos de corrente e tensão no alimentador, enviados pelos PMUs, por meio de algoritmos computacionais específicos para realizar essas medições dos sinais adquiridos, e com elas estimar, com aceitável grau de precisão e segurança, o local ou região que ocorreu a falta.

Neste cenário, deve-se buscar uma melhor relação entre os custos de implantação dos dispositivos no alimentador, os benefícios aos consumidores em termos de qualidade e credibilidade do serviço de distribuição de energia, além dos retornos financeiros fornecidos para as empresas distribuidoras. A localização ótima desses equipamentos no alimentador e o processamento digital das medidas contribuem diretamente na eficiência, precisão e confiabilidade dos algoritmos para localização de faltas (BISCARO, 2009).

A figura 4 ilustra o sistema de localização de faltas pesquisado e melhorado por Bísaro (2009).

Figura 4: Estrutura do sistema localizador de faltas.



Fonte: (BISCARO, 2009).

Este sistema é adequado para localizar os mais diversos tipos de falta, pois nenhuma hipótese sobre a impedância de falta é considerada na modelagem da falta empregada pelo algoritmo de localização de faltas (BISCARO, 2009).

Na concepção do sistema para localização de faltas em alimentadores radiais de distribuição, considera-se que as medições disponíveis são somente os dados esparsos medidos (LUO et al., 2004), isto é, os fasores das tensões e correntes pré e pós-falta nas fases medidos no ponto de saída do alimentador (na subestação) e tensões pós-falta medidas em algumas barras remotas do alimentador. (PEREIRA, 2007).

As simulações dos sinais de tensão e corrente das faltas são realizadas por meio do software “Alternative Transients Program” (ATP). Utilizando a transformada rápida de Fourier (EMBREE, 1999) nas amostras dos sinais das tensões e correntes disponíveis, é gerado o espectro de frequências destes sinais, além da magnitude e da fase de cada uma das frequências que os compõem. Assim, a análise e processamento digital dos sinais são feitos através da transformada rápida de Fourier para fornecer os fasores das tensões e correntes de falta necessários para a execução do algoritmo de localização de faltas. (BISCARO, 2009).

Para a identificação do tipo de falta é implementado um algoritmo baseado na metodologia proposta por Decanini (2008), que utiliza os sinais das correntes trifásicas medidas na saída do alimentador e, através de um sistema de inferência fuzzy, identifica o tipo e as fases envolvidas na falta. (BISCARO, 2009).

O algoritmo selecionado para localização de faltas adotado neste trabalho é proposto por Pereira (2008), na qual a metodologia para localização de faltas em circuitos de distribuição consiste da aquisição e monitoramento de dados na saída dos

alimentadores na subestação, e um conjunto de pontos mínimos necessários, alocados no alimentador para aquisição dos valores de tensão pré e pós-falta. Juntamente com os dados das medições, o algoritmo necessita de uma base de dados contendo as impedâncias das seções das linhas e a potência nominal dos transformadores conectados ao alimentador (BISCARO, 2009).

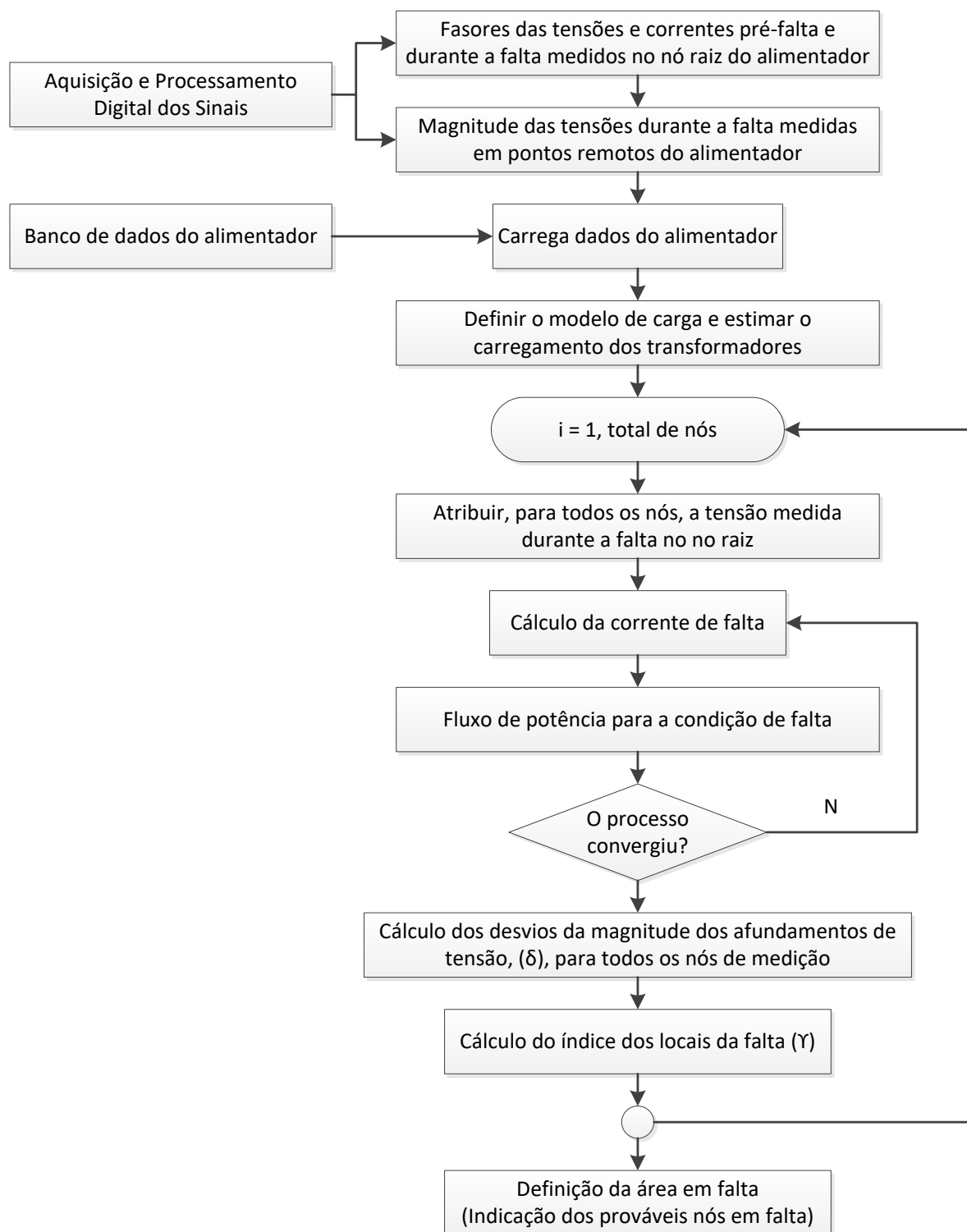
A maioria das redes aéreas de distribuição de energia elétrica apresentam topologia radial, várias seções, ramais laterais trifásicos, bifásicos ou monofásicos, ausência de transposição, cargas dos mais variados tipos e relação X/R baixa, quando comparadas às redes aéreas de transmissão de energia. Desta forma, um algoritmo para localização de faltas deve ser capaz de lidar com essas características, empregando técnicas apropriadas para análise dessas redes. Para satisfazer esses requisitos, o algoritmo de localização de faltas usado para alocar os medidores de tensão de forma otimizada foi desenvolvido com base no algoritmo de fluxo de potência do tipo varredura (backward/forward sweep) (CHENG et al., 1995), o qual é adequado e eficiente para ser aplicado às redes de distribuição (BISCARO, 2009).

O princípio básico desse algoritmo para localizar a falta é que, na presença de faltas no alimentador, afundamentos de tensão propagam-se apresentando características diferentes para cada ponto do alimentador. Isso possibilita que o algoritmo utilize medições esparsas de tensões ao longo do alimentador para fornecer, com precisão adequada, a região ou até mesmo o local da falta (BISCARO, 2009).

O diagrama de blocos apresentado na Figura 5 detalha passo a passo o processo de localização de faltas proposto em BISCARO (2009).



Figura 5: Diagrama de blocos do algoritmo de localização de faltas



Fonte: (BISCARO, 2009).

## 2.4 ALGORITMO GENÉTICO

O algoritmo genético (AG) é uma técnica de busca muito usada em redes de distribuição de energia elétrica. Ele se baseia no mecanismo da evolução das espécies e da genética natural. Foi inventado por Holland na década de 70 e utilizam procedimentos iterativos que simulam os processos naturais da evolução das espécies, na qual, dada uma população inicial, que são possíveis soluções para um problema, os indivíduos com características genéticas melhores (solução com melhor qualidade na função objetivo) têm uma chance maior de sobreviver e de transmitir seu código genético para os descendentes que cada vez mais serão adaptados, enquanto os indivíduos piores (com solução de menor qualidade na função objetivo) tendem a ser eliminados com o passar das gerações. O AG é uma estratégia que utiliza combinações e acumula um conhecimento histórico produzido pelos resultados que vão sendo gerados ao longo do processo, e assim orienta a exploração do espaço de busca (CAMARGO, 2014).

Na aplicação do AG em problemas de otimização, o processo começa gerando uma população inicial composta por um conjunto de indivíduos (possíveis soluções candidatas à otimização do problema). Geralmente são utilizadas estratégias aleatórias para criar essa população. Cada proposta de solução da população inicial é analisada por meio de uma função objetivo que indica o grau de qualidade para o problema a ser otimizado (etapa de avaliação). Depois, são escolhidos os indivíduos (proposta de solução) que poderão se reproduzir, sendo que aqueles que possuem melhor valor da função objetivo têm maior chance de participarem desta fase de seleção. Na próxima fase, os operadores genéticos de recombinação e a mutação são aplicados, de forma que as características adquiridas pelas gerações passadas sejam transmitidas para as próximas gerações e também, que os indivíduos gerados sejam diversificados para favorecer condições para uma melhor exploração do espaço de busca, evitando, assim, que haja convergência antecipada em ótimos locais. Esses indivíduos gerados são inseridos na população corrente e então é verificado se o critério de evolução proposto foi atingido, retornando à etapa de avaliação, caso não tenha atingido, ou encerrado a sua execução em caso contrário (CAMARGO, 2014).

#### **2.4.1 Componentes do Algoritmo Genético:**

- I. Codificação ou representação: A escolha de uma representação adequada é de suma importância para que o processo tenha um bom desempenho. Essa escolha depende, dentre outros aspectos, da natureza das variáveis de decisão do problema que podem ser binárias, inteiras ou reais.
- II. Geração da População Inicial: Para se criar a população inicial se faz o uso de estratégias aleatórias para se conseguir assim uma maior diversidade e abrangência do espaço de busca de soluções. A escolha do método da geração dos indivíduos da população tem influência da natureza do problema e das variáveis de decisão envolvidas. O vetor de codificação pode ser escolhido por exemplo, randomicamente no caso de variáveis de decisão binária, ou ser criado a partir de um processo aleatório controlado.
- III. Determinação da Função Objetivo e Manipulação das Infactibilidades: É nesta etapa que é avaliada o grau de adaptação de cada indivíduo determinado a partir da função objetivo que indica a qualidade de cada uma das soluções. É aqui que devemos desenvolver mecanismos para contornar as situações de infactibilidades caso ocorra.
- IV. Seleção: É o operador genético que seleciona as melhores configurações da população corrente que irão participar da formação da nova população. Existem várias estratégias para realizar a seleção, como a seleção proporcional, seleção determinística e seleção por torneio. A mais conhecida é a seleção por torneio, que consiste em escolher  $n$  jogos e configurar aleatoriamente  $k$  configurações em que o ganhador do jogo (indivíduo selecionado para se processar os operadores genéticos), será o que tiver função objetivo de melhor qualidade para o problema em questão.
- V. Recombinação: Nesta etapa que é feita a troca de material genético entre duas configurações selecionadas para se formar novos indivíduos, (indivíduos que venceram no torneio, ou seja, com melhor adaptação genética) e deles se gera um novo indivíduo com material genético dos dois pais selecionados. Como os pais são mais fortes que os demais a chance desse filho ser forte (de boa qualidade para o problema) é grande. Existem vários métodos de recombinação, dentre eles tem a recombinação por ponto e o método PMX (partially matched crossover), neste método, dois pontos de recombinação são selecionados aleatoriamente e o PMX atua posicionando trocas sábias. A

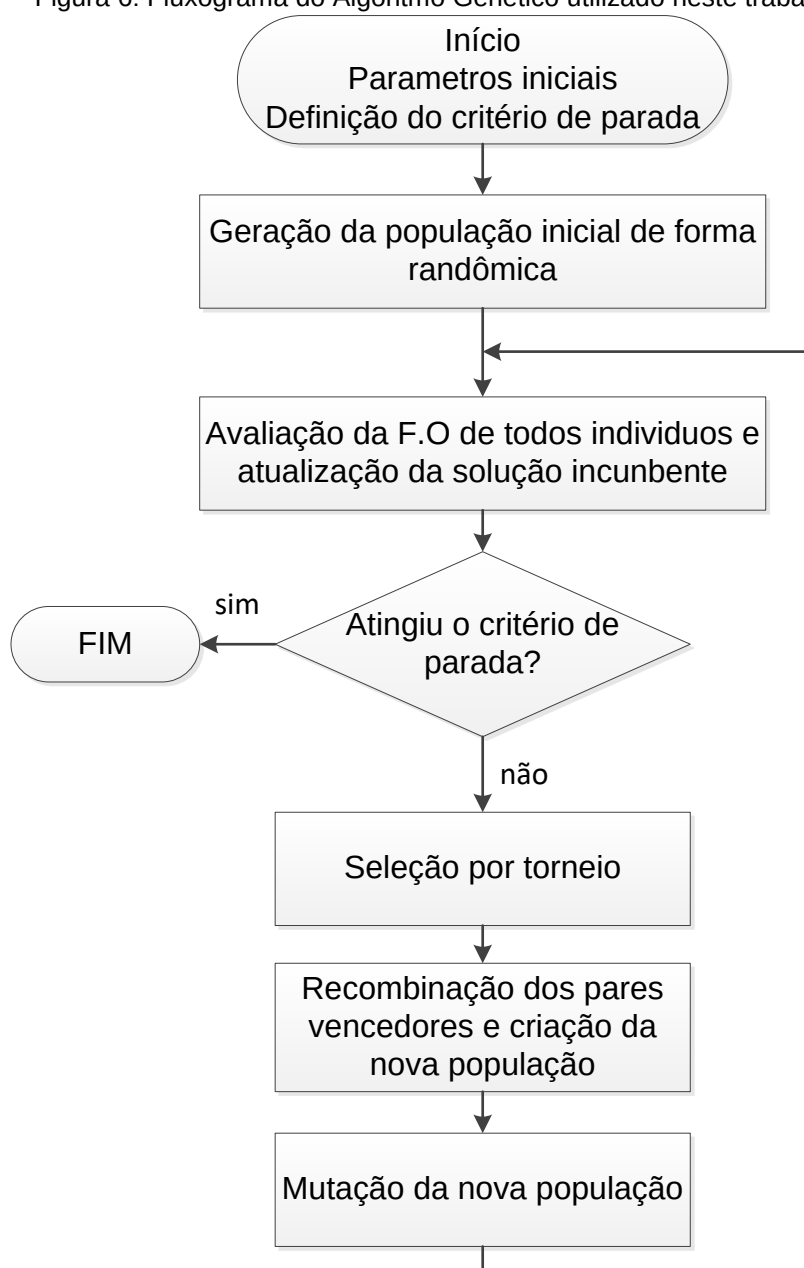
primeira utilizada quando a resposta será um vetor binário e o PMX quando se tem uma solução com variáveis inteiras e todos os elementos do problema devem estar presentes na solução como no problema do caixeiro viajante que se traça uma rota de viagem. A taxa de recombinação é geralmente escolhida entre  $[0,5;1,0]$ , isso implica que ao gerar um valor randômico, se esse valor for menor que a taxa de recombinação então os indivíduos são re combinados e se não eles permanecem sem recombinar.

- VI. Mutação: A mutação é feita nos indivíduos já re combinados e geralmente a taxa de mutação é escolhida entre  $[0,001;0,05]$  esse valor multiplicado pelo número de indivíduos e pelo tamanho do vetor se encontra o valor da quantidade de indivíduos que devem ser mutados e quantos elementos do vetor que deve ser alterado. Agora com os novos indivíduos gerados teremos uma nova população.
- VII. Critério de parada: O critério de parada é determinado pelo programador, pode ser implementado, como por exemplo, o algoritmo para depois de um número fixo de iterações ou não melhora incumbente depois de um certo número de iterações, dentre outras CAMARGO (2014, p. 53):

Na Figura 6 podemos observar o algoritmo genético implementado neste trabalho passo a passo:

A forma em que foi aplicado o Algoritmo Genético ao problema de alocação de PMUs está detalhada na seção 3.1.

Figura 6: Fluxograma do Algoritmo Genético utilizado neste trabalho.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

## 2.5 SOFTWARES UTILIZADOS

O ATP (COMITE ARGENTINO DE USUÁRIOS DEL EMTP/ATP,2002) é o *software* escolhido para fazer a simulação da rede. Os dados da rede serão gerados pelos PMUs, simulados no ATP e, analisados pelo algoritmo, que processa esses dados e gera as possíveis barras com defeito.

No processo de localização das faltas o programa gera uma lista de prioridades no qual serão apresentados as possíveis barras com defeito e a barra que se supõe

ter acontecido a falta, por meio da lista construída gera-se toda uma região com possíveis faltas.

O ambiente computacional para a implementação do algoritmo genético será o MATLAB (MathWorks,2011), que é bastante conhecido por engenheiros e estudantes de engenharia.

### 3 ANÁLISE E DISCUSSÕES DOS RESULTADOS

Neste capítulo será apresentada a metodologia que foi utilizada para a aquisição dos dados gerados pelo algoritmo localizador de faltas e o desenvolvimento do AG, a ser aplicado no problema de alocação.

#### 3.1 METODOLOGIA

A metodologia aplicada nesse trabalho seguiu-se as seguintes etapas:

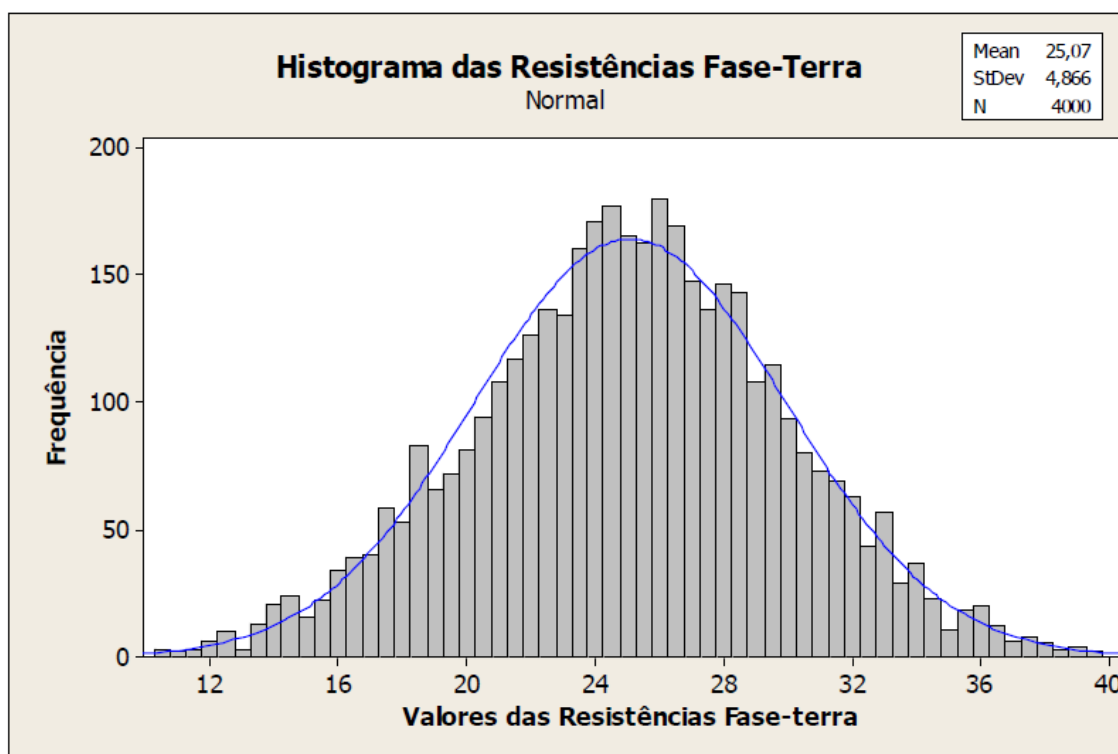
Iniciou-se o AG criando a população inicial. A população foi composta por 20 indivíduos em que cada um deles foi representado por um vetor de tamanho  $n$  = ao número de medidores que serão instalados no sistema, esse vetor representa as barras onde serão instalados os PMUs. A quantidade mínima de PMUs para que o processo possa funcionar com eficiência é de 2 medidores porem nesse trabalho utilizamos 4 para que assim fosse possível comparar com outros trabalhos encontrados na literatura.

Depois de alocados os medidores nas configurações dos indivíduos gerados na população inicial, simulamos alguns tipos de falhas na rede para calcular o valor da função objetivo (FO), sendo que os tipos de falhas simulados conforme estatística apresentada na Tabela 1 serão:

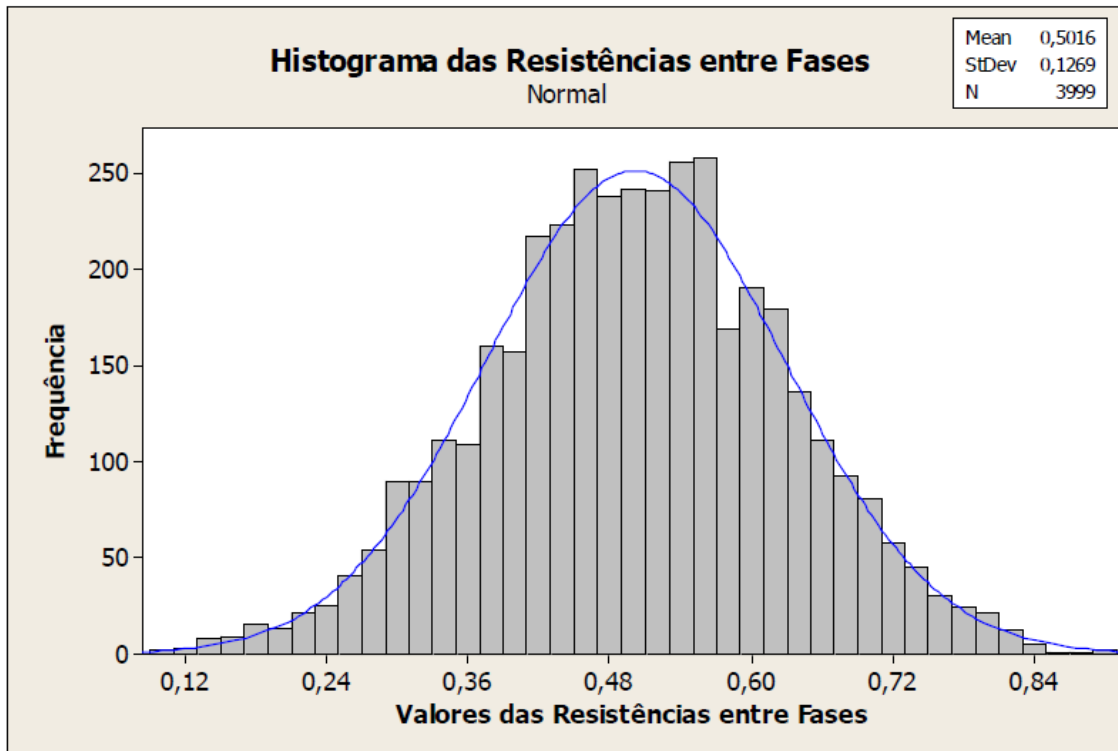
- Falta fase-terra;
- Falta fase-fase;
- Falta trifásica.

Na Figura 8 (a) estão representados alguns dos valores das resistências de fase-terra, esses valores foram utilizados como base para os testes que foram feitos, e na Figura 8 (b) alguns valores das resistências de falta entre fases que utilizamos nas simulações de faltas executadas no *software* ATP. Com base nesses histogramas foram simuladas as faltas seguindo a estatística apresentada.

Figura 7 Histograma das resistências de falta fase-terra e entre fases.



(a) Resistencia Fase-Terra.



(b) Resistência em Fases.

Fonte: (Biscaro,2009).



Os dados utilizados para a simulação da rede foram apresentados em Biscaro (2013), tais como as impedâncias de linhas e alimentadores, tensões e cargas dos transformadores.

Estas simulações fornecerão as formas de onda das tensões e correntes elétricas da rede, que serão utilizadas pelo software de localização de faltas, que utiliza os dados fornecidos pelos PMUs e na sequência fornecer a posição da falta em teste.

Todas as falhas foram simuladas em barras aleatórias e as fases nas quais estavam em falta também serão aleatórias nos testes, de modo que não favoreça uma alocação em relação a outra. O objetivo é analisar o comportamento do algoritmo de localização das faltas quando os medidores estão alocados em determinadas barras.

Estes mostram uma sequência com as prioridades das barras a serem observadas pelas equipes de busca de manutenção. Por exemplo, para uma falta na barra 130 com os medidores alocados nas barras 18, 110, 122 e 123. O resultado dado pelo programa localizador de falta está apresentado na Tabela 2.

A primeira coluna mostra as barras e a segunda a prioridade com que ela deve ser observada pela equipe de busca, nesse caso, o programa identificou a barra faltosa na quarta posição. Desta forma, o programa marcou o valor 4 e isso demonstra que neste caso, o posicionamento dos PMUs foi eficiente, uma vez que apresentou uma região faltosa que segue a barra [101 100 99 98 97 96 95] e que são apresentadas com grau de prioridade alto.

Tabela 2: Relação de barras em falta para uma falta simulada na barra 98, fase A, com resistência de falta fase-terra de 41,87 ohms.

| Posição  | Nº. da Barra | Probabilidade de Falta (%) |
|----------|--------------|----------------------------|
| 1        | 101          | 100.000000                 |
| 2        | 100          | 99.999999                  |
| 3        | 99           | 99.999999                  |
| <b>4</b> | <b>98</b>    | <b>99.999998</b>           |
| 5        | 97           | 99.999997                  |
| 6        | 96           | 99.999997                  |
| 7        | 95           | 99.999997                  |
| 8        | 102          | 14.820462                  |
| 9        | 93           | 9.405456                   |
| 10       | 94           | 9.405456                   |

Fonte: Elaborado pelo Autor.

A função objetivo foi definida somando todas as posições marcadas em cada um dos testes feitos e dividindo pela quantidade de testes realizados por posição definida para os medidores.

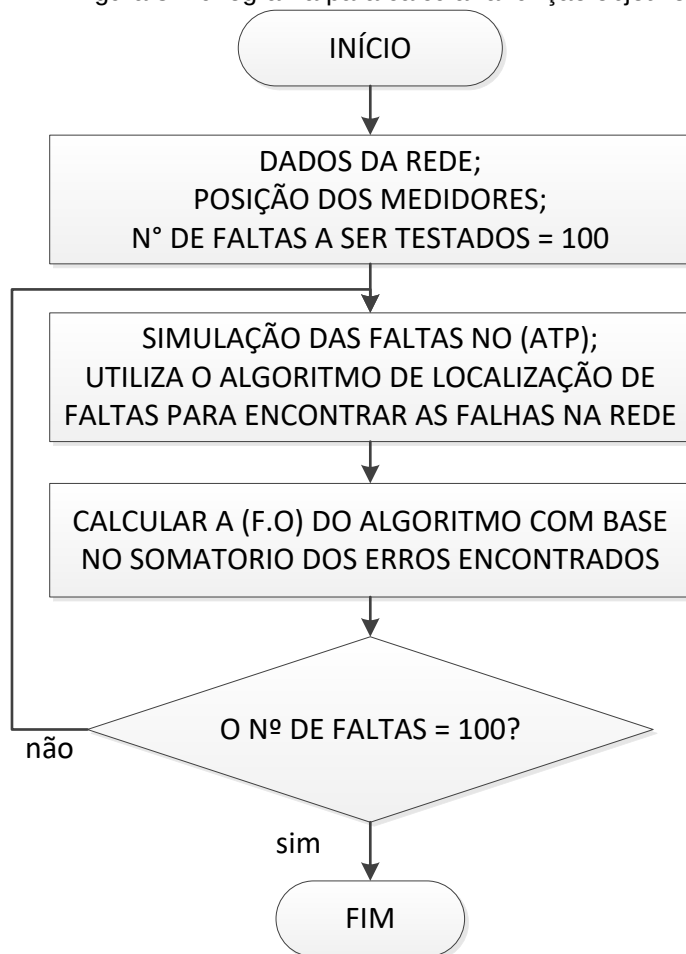
$$F.O = \frac{P - 1 + P - 2 + \dots P - N}{K} \quad (1)$$

Onde  $P - N$  representa a posição marcada no primeiro teste e  $K$  representa a quantidade de testes feitos.

Nesse trabalho foram feitos 100 testes aleatórios de faltas para cada indivíduo da população gerada.

A F.O define se o resultado obtido é um resultado de qualidade ou não, que possua menos erros na hora de localizar as faltas na rede. Dentre os possíveis resultados bons será obtido o melhor valor, que se tornará a solução incumbente. Segue apresentado a seguir na Figura 9 o fluxograma para o cálculo da F.O.

Figura 8 Fluxograma para calcular a função objetivo.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Finalizado o processo inicial do AG, segue-se então as outras etapas do algoritmo.

A próxima etapa inicia-se com a recombinação, nesta, o algoritmo seleciona 4 indivíduos da população corrente de maneira aleatória e faz o processo chamado de torneio, ele compara as funções objetivos dos indivíduos e seleciona aquela que satisfaz os objetivos da análise, esse indivíduo com o melhor valor de função objetivo é selecionado para o próximo passo e esse processo é repetido por 20 vezes e são selecionados 20 pais, depois esses pais vencedores são recombinados dois a dois. Para que os pais sejam recombinados é gerado um valor aleatório de 0 a 1; se esse valor for maior que 0,6 (taxa de recombinação definida no trabalho), o algoritmo recombina o código genéticos dos dois pais, porém, se o valor for menor os códigos genéticos dos pais selecionados se mantem e eles farão parte da nova população que será gerada.

O método de recombinação escolhido foi o de recombinação por ponto, que funciona como mostra a figura 10:

Figura 9 Exemplo de recombinação  
PONTO DE RECOMBINAÇÃO



|         |    |    |    |     |
|---------|----|----|----|-----|
| PAI 1   | 20 | 45 | 80 | 110 |
| PAI 2   | 18 | 52 | 95 | 122 |
| FILHO 1 | 20 | 45 | 95 | 122 |
| FILHO 2 | 18 | 52 | 80 | 110 |

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Como pode-se observar, o programa seleciona aleatoriamente um ponto do código genético dos pais de qual intervalo se obtém o ponto e a partir dele os dois são recombinados, o filho 1 tem as características iniciais do pai 1 e o resto do pai 2, e o filho 2 tem as primeiras características do pai 2 e as últimas do pai 1.

No processo de mutação que segue na sequência, a taxa de mutação escolhida foi de 0,05, isso implica que a quantidade de indivíduos a serem mutados é:

$$0,05 \times 4 \times 20 = 4$$

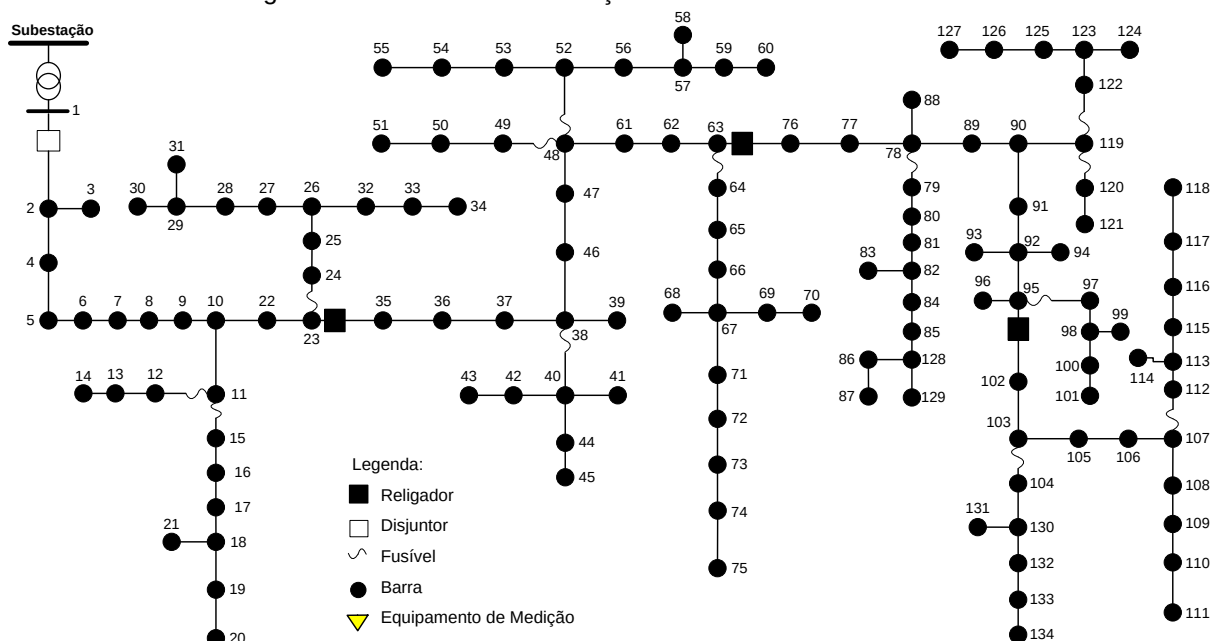
Que é a multiplicação da taxa de mutação, número de medidores e tamanho da população a ser analisada. Ou seja, depois de criar a nova população a partir dos pais vencedores no torneio, 4 desses indivíduos escolhidos aleatoriamente, terão um dos valores do vetor alterado por um outro número também randômico que representa as barras a que será instalado os PMUs.

Quando terminado todos esses processos foram analisados os resultados obtidos a partir dessa nova população, verificamos qual a melhor solução e a salvamos como solução incumbente, esse processo se repetiu por 30 vezes de modo que foi possível analisar uma grande quantidade de possíveis posições e chegar a solução de melhor qualidade.

### 3.2 SISTEMA ELÉTRICO A SER ESTUDADO

O sistema elétrico utilizado nesse trabalho é um alimentador real de distribuição radial trifásico com 134 barras, com tensão 13,8 kV e potência nominal de 7,065 MVA

Figura 10: Sistema de distribuição real trifásico de 134 barras.



Fonte: (Biscaro, 2013).

Os dados do alimentador estão no apêndice A. Estes foram fornecidos por Biscaro (2013).

### 3.3 RESULTADO ENCONTRADO

Dentre os resultados pesquisados, o melhor resultado em que fora obtido menor quantidade de falhas foi o vetor [32 57 108 126], que representa as barras com melhor posicionamento para a instalação dos medidores, as faltas testadas nesse posicionamento seguem na Tabela 3. Com as respectivas resistências e também os resultados apontados.

Como pode-se observar a Tabela 3, há algumas faltas grifadas que serão mostradas a fim de se apresentar o desempenho do algoritmo de localização de faltas para esse posicionamento dos medidores.

Tabela 3 Faltas testadas para a presente configuração de medidores.

| Nº DA FALTA | BARRA EM FALTA | FASE EM FALTA | RESISTENCIA DE FASE TERRA | RESISTENCIA ENTRE FASES | POSIÇÃO DA BARRA |
|-------------|----------------|---------------|---------------------------|-------------------------|------------------|
| 1           | 97             | BC            | 38,05                     | 0,35                    | 14               |
| 2           | 132            | B             | 44,50                     | 0,60                    | 3                |
| 3           | 22             | C             | 39,89                     | 0,51                    | 3                |
| 4           | 73             | BC            | 34,47                     | 0,56                    | 4                |
| 5           | 66             | A             | 37,08                     | 0,38                    | 10               |
| 6           | 127            | B             | 39,75                     | 0,37                    | 1                |

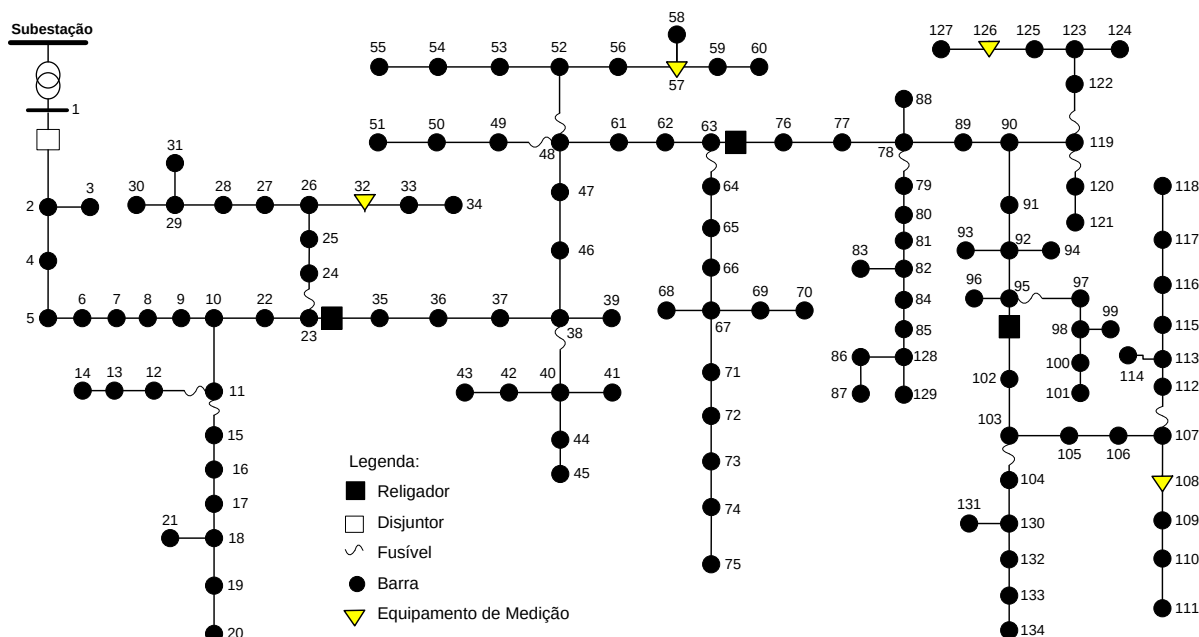
| Nº DA FALTA | BARRA EM FALTA | FASE EM FALTA | RESISTENCIA DE FASE TERRA | RESISTENCIA ENTRE FASES | POSIÇÃO DA BARRA |
|-------------|----------------|---------------|---------------------------|-------------------------|------------------|
| 7           | 116            | B             | 37,53                     | 0,45                    | 3                |
| 8           | 46             | A             | 38,91                     | 0,64                    | 1                |
| 9           | 81             | C             | 38,66                     | 0,39                    | 5                |
| 10          | 33             | B             | 37,41                     | 0,38                    | 2                |
| 11          | 123            | C             | 42,53                     | 0,54                    | 2                |
| 12          | 67             | B             | 40,69                     | 0,70                    | 9                |
| 13          | 70             | B             | 33,10                     | 0,01                    | 6                |
| 14          | 80             | B             | 37,02                     | 0,75                    | 6                |
| 15          | 113            | AB            | 36,75                     | 0,38                    | 1                |
| 16          | 120            | ABC           | 41,12                     | 0,69                    | 3                |
| 17          | 65             | C             | 36,64                     | 0,67                    | 3                |
| <b>18</b>   | <b>68</b>      | <b>C</b>      | <b>41,45</b>              | <b>0,13</b>             | <b>7</b>         |
| 19          | 42             | B             | 40,34                     | 0,32                    | 3                |
| 20          | 73             | C             | 41,53                     | 0,50                    | 11               |
| 21          | 104            | A             | 38,41                     | 0,33                    | 6                |
| 22          | 50             | AB            | 41,27                     | 0,11                    | 3                |
| 23          | 66             | C             | 40,64                     | 0,91                    | 4                |
| 24          | 77             | B             | 40,92                     | 0,32                    | 1                |
| 25          | 65             | C             | 39,21                     | 0,89                    | 3                |
| 26          | 132            | C             | 35,48                     | 0,71                    | 5                |
| 27          | 46             | C             | 40,04                     | 0,3                     | 1                |
| 28          | 127            | A             | 41,74                     | 0,42                    | 1                |
| 29          | 71             | A             | 40,41                     | 0,67                    | 5                |
| 30          | 10             | BC            | 38,20                     | 0,73                    | 3                |
| 31          | 127            | C             | 40,05                     | 0,77                    | 2                |
| 32          | 74             | C             | 41,56                     | 0,65                    | 12               |
| 33          | 119            | C             | 40,48                     | 0,70                    | 3                |
| <b>34</b>   | <b>128</b>     | <b>C</b>      | <b>42,83</b>              | <b>0,50</b>             | <b>98</b>        |
| 35          | 35             | B             | 36,59                     | 0,54                    | 1                |
| 36          | 71             | AB            | 40,66                     | 0,23                    | 9                |
| 37          | 109            | A             | 37,57                     | 0,29                    | 3                |
| 38          | 72             | C             | 37,03                     | 0,33                    | 10               |
| 39          | 111            | A             | 41,52                     | 0,41                    | 1                |
| 40          | 125            | AB            | 40,49                     | 0,56                    | 1                |
| 41          | 108            | B             | 42,88                     | 0,56                    | 4                |
| 42          | 31             | A             | 42,60                     | 0,52                    | 3                |
| 43          | 46             | C             | 36,44                     | 0,63                    | 1                |
| 44          | 102            | B             | 37,95                     | 0,66                    | 1                |
| 45          | 23             | A             | 34,13                     | 0,56                    | 22               |
| 46          | 11             | C             | 36,55                     | 0,58                    | 5                |
| 47          | 19             | C             | 43,93                     | 0,43                    | 13               |
| 48          | 77             | A             | 42,69                     | 0,53                    | 1                |
| 49          | 79             | CA            | 38,55                     | 0,34                    | 3                |
| 50          | 118            | A             | 38,60                     | 0,47                    | 1                |
| 51          | 103            | A             | 42,30                     | 0,72                    | 7                |
| 52          | 132            | B             | 39,35                     | 0,69                    | 3                |
| 53          | 111            | B             | 37,26                     | 0,36                    | 1                |
| 54          | 113            | B             | 44,18                     | 0,66                    | 5                |

| Nº DA FALTA | BARRA EM FALTA | FASE EM FALTA | RESISTENCIA DE FASE TERRA | RESISTENCIA ENTRE FASES | POSIÇÃO DA BARRA |
|-------------|----------------|---------------|---------------------------|-------------------------|------------------|
| 55          | 84             | C             | 39,36                     | 0,23                    | 8                |
| 56          | 31             | BC            | 36,92                     | 0,35                    | 3                |
| 57          | 27             | BC            | 42,99                     | 0,33                    | 5                |
| 58          | 83             | C             | 38,43                     | 0,38                    | 7                |
| 59          | 119            | A             | 40,24                     | 0,38                    | 3                |
| 60          | 122            | B             | 36,87                     | 0,94                    | 1                |
| 61          | 65             | A             | 42,67                     | 0,10                    | 11               |
| 62          | 28             | B             | 42,27                     | 0,21                    | 4                |
| 63          | 114            | B             | 43,41                     | 0,63                    | 6                |
| 64          | 97             | C             | 42,90                     | 0,42                    | 3                |
| 65          | 4              | A             | 38,83                     | 0,48                    | 7                |
| 66          | 86             | C             | 42,88                     | 0,80                    | 95               |
| 67          | 17             | B             | 34,92                     | 0,72                    | 9                |
| 68          | 43             | A             | 38,10                     | 0,48                    | 2                |
| 69          | 131            | B             | 41,65                     | 0,53                    | 4                |
| 70          | 40             | B             | 42,69                     | 0,62                    | 7                |
| 71          | 114            | A             | 40,77                     | 0,61                    | 6                |
| 72          | 59             | C             | 36,59                     | 0,48                    | 3                |
| 73          | 77             | A             | 39,98                     | 0,32                    | 1                |
| 74          | 131            | C             | 38,59                     | 0,44                    | 4                |
| 75          | 52             | A             | 38,81                     | 0,65                    | 4                |
| 76          | 12             | CA            | 39,88                     | 0,60                    | 17               |
| 77          | 103            | C             | 42,49                     | 0,57                    | 1                |
| 78          | 4              | A             | 40,33                     | 0,69                    | 7                |
| 79          | 6              | B             | 38,66                     | 0,43                    | 5                |
| 80          | 77             | C             | 42,66                     | 0,72                    | 1                |
| 81          | 78             | AB            | 41,31                     | 0,59                    | 8                |
| <b>82</b>   | <b>28</b>      | <b>C</b>      | <b>38,82</b>              | <b>0,84</b>             | <b>3</b>         |
| 83          | 85             | B             | 36,88                     | 0,41                    | 1                |
| 84          | 48             | AB            | 40,22                     | 0,24                    | 1                |
| 85          | 112            | C             | 37,55                     | 0,76                    | 2                |
| 86          | 63             | B             | 42,97                     | 0,43                    | 13               |
| 87          | 117            | AB            | 39,73                     | 0,69                    | 2                |
| 88          | 41             | AB            | 44,68                     | 0,54                    | 6                |
| 89          | 113            | B             | 38,48                     | 0,63                    | 5                |
| 90          | 112            | C             | 41,43                     | 0,49                    | 2                |
| 91          | 89             | C             | 37,51                     | 0,14                    | 1                |
| 92          | 75             | A             | 39,10                     | 0,76                    | 1                |
| 93          | 98             | A             | 43,04                     | 0,27                    | 4                |
| 94          | 72             | B             | 38,23                     | 0,74                    | 4                |
| 95          | 102            | CA            | 34,90                     | 0,39                    | 1                |
| 96          | 40             | C             | 41,28                     | 0,55                    | 3                |
| 97          | 75             | A             | 40,33                     | 0,34                    | 1                |
| 98          | 72             | B             | 38,30                     | 0,70                    | 4                |
| 99          | 8              | C             | 41,68                     | 0,31                    | 17               |
| 100         | 49             | A             | 40,38                     | 0,46                    | 3                |

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Agora para que se possa ter um melhor entendimento sobre a posição dos medidores segue o sistema com os medidores posicionados. Na Figura 11 apresenta-se o modelo do sistema com os medidores posicionados para a resposta encontrada nos testes.

Figura 11 Modelo do sistema com os medidores posicionados



Fonte: (Biscaro, 2013).

Para a falta 18 tem-se a falta na barra 68, resistência de fase-terra igual a 41,45, resistência entre fases igual a 0,13 e fase em falta é a fase C. Organizamos uma tabela que mostra a posição em que o algoritmo marcou a nossa barra em falta.

Tabela 4 Tabela apontando a posição encontrada pelo algoritmo para a falta na barra 68

| Posição | Nº. Da Barra | Probabilidade de falta (%) |
|---------|--------------|----------------------------|
| 1       | 63           | 100,00                     |
| 2       | 64           | 100,00                     |
| 3       | 65           | 100,00                     |
| 4       | 66           | 100,00                     |
| 5       | 67           | 100,00                     |
| 6       | 69           | 100,00                     |
| 7       | <b>68</b>    | <b>100,00</b>              |
| 8       | 70           | 100,00                     |
| 9       | 71           | 100,00                     |
| 10      | 72           | 100,00                     |
| 11      | 73           | 100,00                     |
| 12      | 74           | 100,00                     |
| 13      | 75           | 100,00                     |
| 14      | 51           | 80,55                      |

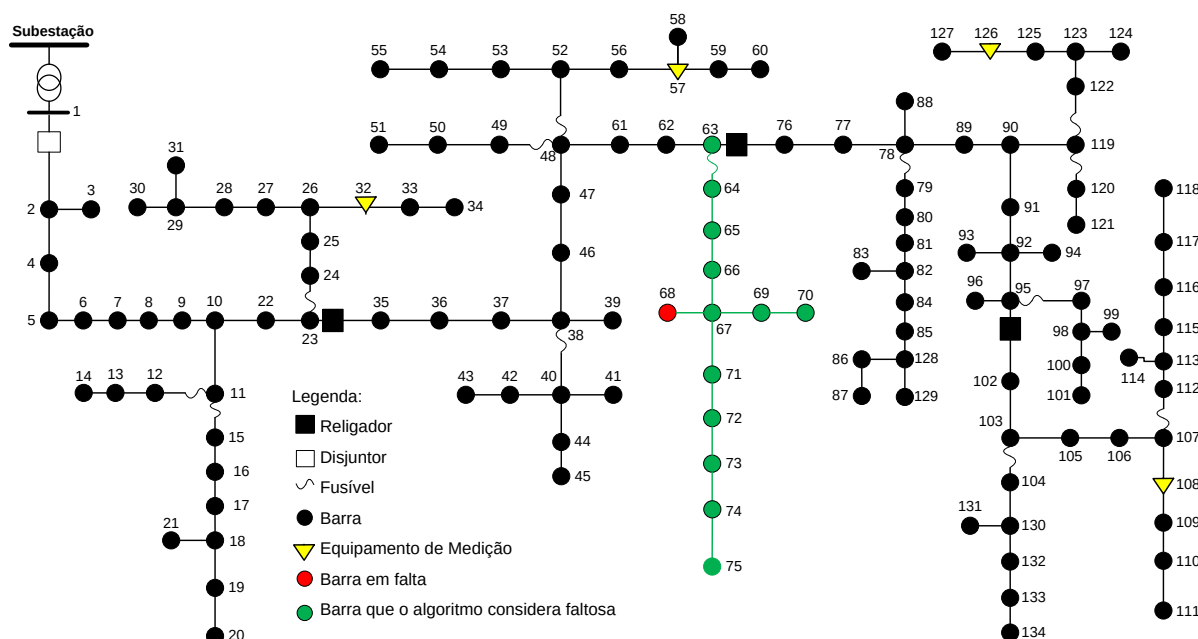


|    |    |       |
|----|----|-------|
| 15 | 50 | 80,55 |
| 16 | 49 | 80,55 |
| 17 | 48 | 80,55 |
| 18 | 61 | 80,55 |
| 19 | 62 | 80,55 |
| 20 | 76 | 41,09 |

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Na Figura 12 observa-se a barra faltosa em vermelho e a região que o algoritmo considera faltosa na cor verde que vai da barra 63 até a barra 75 que são todas as barras marcadas com prioridade alta como mostra a Tabela 4. Essa situação não foi considerado como um erro do algoritmo localizador de faltas nesse trabalho pois embora a barra realmente falta não esteja marcada em primeiro lugar ela foi considerada pelo algoritmo com sendo defeituosa.

Figura 12 Sistema mostrando a região encontrada pelo algoritmo localizador de faltas como sendo região faltosa para uma falta na barra 68



Fonte: (Biscaro, 2013).

Para a falta 34 temos a barra em falta sendo a barra 128, resistência de fase-terra igual a 42,83, resistência entre fases igual a 0,50 e fase em falta é a fase C. Segue a tabela que mostra as 20 primeiras posições em que o algoritmo marcou como sendo barras em falta.

Tabela 5 Tabela apontando a posição encontrada pelo algoritmo para a falta na barra 128

| Posição | Nº Da Barra | Probabilidade de falta (%) |
|---------|-------------|----------------------------|
| 1       | 78          | 100,00                     |
| 2       | 88          | 100,00                     |
| 3       | 79          | 99,41                      |

|    |    |       |
|----|----|-------|
| 4  | 80 | 98,82 |
| 5  | 81 | 98,57 |
| 6  | 82 | 98,33 |
| 7  | 83 | 98,33 |
| 8  | 84 | 97,92 |
| 9  | 85 | 97,67 |
| 10 | 89 | 16,02 |
| 11 | 77 | 13,46 |
| 12 | 76 | 8,84  |
| 13 | 90 | 7,94  |
| 14 | 63 | 7,20  |
| 15 | 64 | 7,20  |
| 16 | 65 | 7,20  |
| 17 | 66 | 7,20  |
| 18 | 67 | 7,20  |
| 19 | 69 | 7,20  |
| 20 | 68 | 7,20  |

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Como podemos observar o algoritmo localizador não conseguiu localizar a barra em falta, ela não chegou a ser marcada entre as 20 primeiras possíveis barras em falta, na verdade ela ficou na 98ª posição no grau de prioridades, o que mostra um erro na localização da falta para o algoritmo localizador de faltas com os medidores nessas posições, outra falta semelhante foi a falta 66 na barra 86 que foi marcada na posição 95 essa barra fica ao lado da 128, podemos supor então que essa região pode ser considerada um ponto onde o algoritmo tem dificuldades para localizar as faltas.

Na Figura 14 podemos ver melhor como o algoritmo se comportou e também o erro ocorrido.



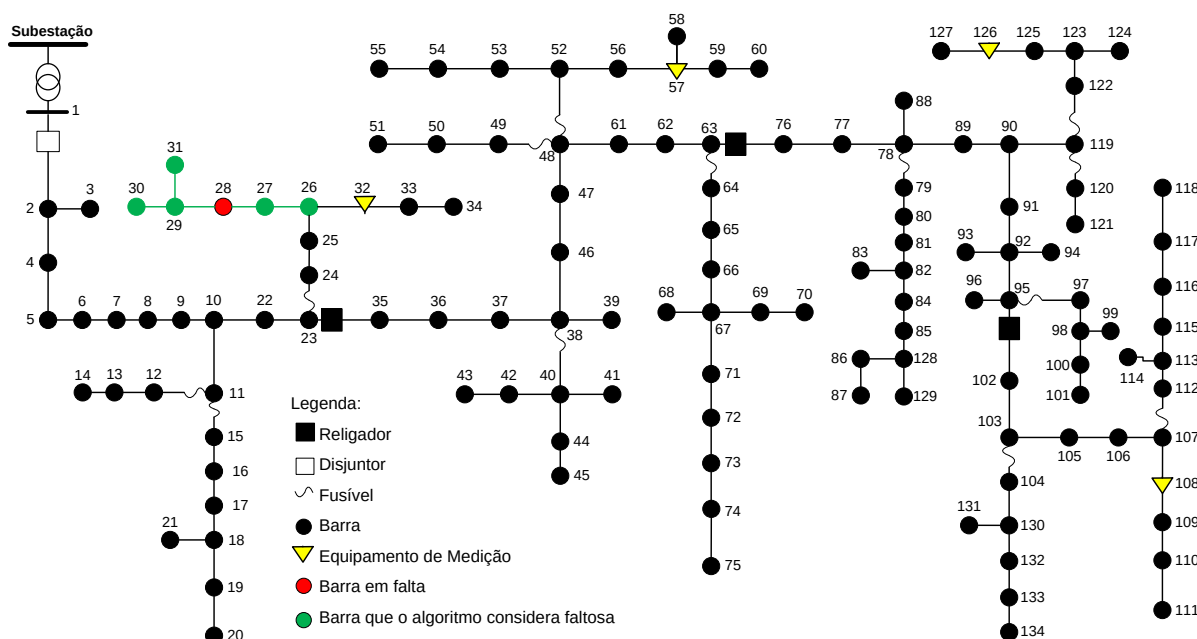
|    |   |      |
|----|---|------|
| 16 | 2 | 2,11 |
| 17 | 3 | 2,11 |
| 18 | 4 | 2,10 |
| 19 | 5 | 2,10 |
| 20 | 6 | 2,10 |

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Para essa falta como pode ser visto, o algoritmo localizador de faltas conseguiu encontrar a falta com uma precisão muito maior pois a barra na qual ocorreu a falta ficou na terceira posição em grau de prioridades a ser observada pela equipe de manutenção, ouve casos também em que o algoritmo encontrou a falta na primeira posição, com precisão ainda maior, isso pode ser observado na Tabela 3, mostrando que as posições dos medidores nesse problema se mostram eficientes.

Para auxiliar na compreensão segue na Figura 14 o sistema com a falta simulada e a resposta dos medidores.

Figura 14 Sistema mostrando a região encontrada pelo algoritmo localizador de faltas como sendo região faltosa para uma falta na barra 28



Fonte: (Biscaro, 2013).

Esses três exemplos foram escolhidos para que o leitor possa entender melhor o funcionamento do algoritmo localizador de faltas e a função dos medidores de tensão PMUs que hipoteticamente seriam instalados nessa rede.

Fazendo uma análise comparativa entre os resultados deste trabalho e àqueles definidos em Biscaro (2009), após serem feitos testes com 200 faltas aleatórias para

cada proposta na intenção de saber qual dos dois resultados tem melhor F.O, foi possível extrairmos algumas conclusões.

Observando então os resultados encontrados, vimos que as duas soluções se mostram eficientes, ambas soluções possuem uma certa dificuldade em localizar faltas em determinadas barras do sistema e apontam uma eficiência muito grande em determinadas regiões do sistema, portanto são soluções ótimas possíveis aos olhos da metaheurística porém não um ótimo global, acreditamos ser possível encontrar outra solução melhor do que as propostas pois as duas obtiveram resultados muito parecidos dependendo da falta simulada, o que nos leva a crer que essas duas soluções estudadas são soluções equivalentes.

## 4 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Esse capítulo traz a conclusão e os trabalhos futuros.

### 4.1 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Os resultados encontrados com os testes feitos mostraram que a alocação otimizada dos medidores melhora o desempenho na localização das faltas e diminui o erro da distância entre a falta real e a falta apontada pelo algoritmo localizador de faltas.

Durante o processo de construção do Algoritmo Genético enfrentamos muitas dificuldades, primeiro por não se ter um conhecimento mais amplo sobre programação e segundo por não ter um computador mais potente. Após a conclusão do programa este levou quase duas semanas para concluir o processo, nas primeiras tentativas de rodar o programa enfrentamos muitas dificuldades com os computadores que não suportavam o programa e acabavam travando, por causa disso, implementamos o programa mais uma vez e assim conseguimos extrair resultados dos testes.

Estes resultados foram satisfatórios, pois cumpriu atendeu ao objetivo de otimizar a alocação dos medidores e consequentemente a melhora na eficiência do algoritmo localizador de faltas e dos próprios PMUs, que quando bem posicionados mostram-se eficientes na localização da falta no sistema.

Embora tenha-se usado quatro medidores isso não implica que deve ser o máximo de medidores utilizados no sistema ou o mínimo, obviamente que se acrescentarmos mais medidores o empreendimento se torna mais caro, mas talvez mais eficaz.

Isso fica a critério de quem vai implementar a instalação dos medidores, foi utilizado essa quantidade de medidores nesse trabalho pelo fato de que todos os outros trabalhos pesquisados utilizaram essa quantidade e assim pode-se comparar os resultados obtidos na pesquisa com o dos outros.

Para os trabalhos futuros espera-se utilizar o algoritmo programado para alocar medidores em redes maiores de distribuição radial, utilizar um sistema da cidade de Sinop como modelo, pois não foram encontrados na literatura nenhum estudo voltado para o estado do Mato Grosso.

E esses estudos sem dúvida alguma são muito importantes para o desenvolvimento de novos meios para a localização de faltas nas redes de distribuição

de energia elétrica do nosso estado, pretendemos também melhorar a nossa F.O. Do Algoritmo Genético a fim de melhorar os resultados.

## 5 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ALLAGUI, B.; BEM, A. H.; HADJ, A. H. **Optimal Placement of Phasor Measurement Units By Genetic Algorithm**. In: First international Conference on Renewable Energies and Vehicular Technology 2012.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Falta de Energia Gera R\$ 437,8 Milhões de Compensações aos Consumidores em 2012**. Disponível em: < <http://abar.org.br/aneel-falta-de-energia-gera-r-4378-milhoes-de-compensacoes-aos-consumidores-em-2012/>>. Acesso em 3 dez. 2016.

ANEEL. Agencia Nacional de Energia Elétrica. **Resolução Normativa 247**: Estabelece as condições para a comercialização de energia elétrica, oriunda de empreendimentos de geração que utilizem fontes primárias incentivadas, com unidade ou conjunto de unidades consumidoras cuja carga seja maior ou igual a 500 kW e dá outras providências. Brasília, DF, 2006.

BÍSCARO, A.A.P. **Proposta de Algoritmos Inteligentes para Localizar Falhas e Monitorar a Qualidade da Energia em Redes de Distribuição de Energia Elétrica**. 2013. 156 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2013.

BÍSCARO, A. A. P. **Modelo Estocástico de Programação Matemática de Alocação de Medidores de Tensão em Alimentadores Radiais de Distribuição de Energia Elétrica para Localização de Falhas e Monitoramento do Perfil de Tensão**. 2009. 94 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2009.

CAMARGO, V. **Algoritmo genético especializado aplicado ao planejamento da expansão de sistemas de distribuição de energia elétrica**. 2014. 175 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2014.

CHENG, C. S.; SHIRMOHAMMADI, D. A. **Three-phase power flow method for real-time distribution system analysis**. IEEE Transactions on Power Systems, New York, v.10, n.2, p.671 – 679, 1995.

COMITE ARGENTINO DE USUÁRIOS DEL EMTP/ATP. **ATP rulebook**. Revista Iberoamericana del ATP, Argentina, v. 3, n. 4, 700 p., 2002.

DECANINI, J. G. M. S. **Deteção e classificação de faltas de curto-circuito em sistemas de distribuição de energia elétrica usando lógica nebulosa**. 2007. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Ilha Solteira, 2008.

GEDRA, R. L.; BORELLI, R.; BARROS, B. F. **Geração, Transmissão, Distribuição e Consumo de Energia Elétrica**. 1º ed. São Paulo: Érica, 2014. 144 p.



GIGUER, S. **Proteção de sistemas de distribuição**. Porto Alegre: Sagra, 1988. 344 p

HUANG, X.; LIU, J.; LIU, Y.; XU, L.; YANG, J.; NI, Y. **A GA Base Optimized PMU-location-decision ALgorithm Considering WAMS Reliability**. In: International Conference on Power System Technology (POWERCON 2014) 2014.

LUO, S.; KEZUNOVIC, M.; SEVICK, D. R. Locating faults in the transmission network using sparse field measurements, simulation data and genetic algorithm. *Electric Power Systems Research*, Texas, v. 71, n. 2, p.169-177, 2004.

MATLAB MathWorks. Version 7.12.0.635(R2011a) 64-bit (win64) March 18, 2011.

ONS. Operador Nacional do Sistema Elétrico. **Submódulo 2.4**: Requisitos mínimos para linhas de transmissão aéreas. Rev. 2.0. [S. I.], 2010.

\_\_\_\_\_. **Submódulo 2.8**: Gerenciamento dos indicadores de desempenho da rede básica e de seus components. Rev. 1.0. [S. I.], 2009.

PEREIRA, R. A. F. **Localização de faltas em alimentadores de distribuição de energia elétrica usando medições esparsas de tensões**. 2007. 131 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Ilha Solteira, 2007.

PEREIRA, R. A. F.; DA SILVA, L. G. W.; MANTOVANI, J. R. S. **Algoritmo baseado em afundamentos de tensão para localização de faltas em alimentadores de distribuição de energia elétrica**, *Sba Controle & Automação*, Campinas, v.19, n.3, p.337-349, 2008.

PEREIRA, R. A. F.; SILVA, L. G. W.; MANTOVANI, J. R. S. **PMUs optimized allocation using a tabu search algorithm for fault location in electric power distribution system**. In: TRANSMISSION AND DISTRIBUTION CONFERENCE AND EXPOSITION: LATIN AMERICA IEEE/PES, 2004, São Paulo. Proceeding.... São Paulo: [s. n.], 2004. p.143-148.

SAIDELLES, T. **Rede de Monitoramento de Falhas Temporárias e/ou Permanentes em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica**. 2013. 70 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnólogo em Redes de Computadores) – Universidade Federal de Santa Maria Colégio Técnico Industrial de Santa Maria Curso Superior de Tecnologia em Redes de Computadores. 2013.

SCHNEIDER ELECTRIC. **Programa de formação técnica continuada: Efeitos do curto-circuito. Cadernos Técnicos**, [SI]. 11 p. Disponível em: < [https://www.schneider-electric.com.br/documents/cadernos-tecnicos/tema2\\_efeitos.pdf](https://www.schneider-electric.com.br/documents/cadernos-tecnicos/tema2_efeitos.pdf) >. Acesso em: 15 dez. 2016

## 6 APÊNDICE A – DADOS DO ALIMENTADOR

Dados do alimentado de distribuição trifásico real, com 134 barras, tensão nominal de 13,8 kV e potência nominal de 7,065 MVA. A topologia deste sistema está ilustrada na Figura 7. A Tabela A.1 contém os dados do alimentador, com as seções de linhas e seus comprimentos, tamanho dos condutores e cargas conectadas, sendo que as potências especificadas estão conectadas às barras da coluna definida como “Nó Final”. As matrizes de impedâncias da rede para cada trecho do alimentador são:

Seção 0-1: Matriz de impedância equivalente dos sistemas de geração, transmissão e transformador da subestação.

$$[Z_{0-1}] = \begin{bmatrix} 0,1960 + j0,530 & 0,1960 + j0,530 & 0,2900 + j1,920 \\ 0,1960 + j0,530 & 0,2900 + j1,920 & 0,1960 + j0,530 \\ 0,2900 + j1,920 & 0,1960 + j0,530 & 0,1960 + j0,530 \end{bmatrix} [\Omega]$$

Seção dos condutores de bitola #2:

$$[Z_{\#2}] = \begin{bmatrix} 1,0840 + j0,998 & 0,0600 + j0,478 & 0,0600 + j0,450 \\ 0,0600 + j0,478 & 1,0840 + j0,998 & 0,0600 + j0,536 \\ 0,0600 + j0,450 & 0,0600 + j0,536 & 1,0840 + j0,998 \end{bmatrix} [\Omega/Km]$$

Seção dos condutores de bitola #4:

$$[Z_{\#4}] = \begin{bmatrix} 1,6440 + j1,006 & 0,0600 + j0,478 & 0,0600 + j0,450 \\ 0,0600 + j0,478 & 1,6440 + j1,006 & 0,0600 + j0,536 \\ 0,0600 + j0,450 & 0,0600 + j0,536 & 1,6440 + j1,006 \end{bmatrix} [\Omega/Km]$$

Seção dos condutores de bitola #1/0:

$$[Z_{\#1/0}] = \begin{bmatrix} 0,7567 + j1,0067 & 0,0600 + j0,478 & 0,0600 + j0,450 \\ 0,0600 + j0,478 & 1,6440 + j1,006 & 0,0600 + j0,536 \\ 0,0600 + j0,450 & 0,0600 + j0,536 & 1,6440 + j1,006 \end{bmatrix} [\Omega/Km]$$

Seção dos condutores de bitola #4/0:

$$[Z_{\#4/0}] = \begin{bmatrix} 0,4272 + j0,9609 & 0,0600 + j0,478 & 0,0600 + j0,450 \\ 0,0600 + j0,478 & 0,4272 + j0,9609 & 0,0600 + j0,536 \\ 0,0600 + j0,450 & 0,0600 + j0,536 & 0,4272 + j0,9609 \end{bmatrix} [\Omega/Km]$$

Tabela A.1 Dados do Alimentador

| Nó Inicial | Nó Final | Distância (m) | Bitola do Conductor | Potência (kVA) | Nó Inicial | Nó Final | Distância (m) | Bitola do Conductor | Potência (kVA) |
|------------|----------|---------------|---------------------|----------------|------------|----------|---------------|---------------------|----------------|
| 0          | 1        | -----         | -----               | -----          | 37         | 38       | 10,0          | #4/0                | 0              |
| 1          | 2        | 900,0         | #4/0                | 0              | 38         | 39       | 70,0          | #4/0                | 3              |
| 2          | 3        | 50,0          | #2                  | 45             | 38         | 40       | 100,0         | #4/0                | 0              |
| 2          | 4        | 100,0         | #4/0                | 0              | 40         | 41       | 60,0          | #4                  | 75             |

|     |     |       |      |       |     |     |       |      |       |
|-----|-----|-------|------|-------|-----|-----|-------|------|-------|
| 4   | 5   | 40,0  | #4/0 | 75    | 40  | 42  | 50,0  | #4   | 75    |
| 5   | 6   | 200,0 | #4/0 | 75    | 42  | 43  | 10,0  | #4   | 75    |
| 6   | 7   | 200,0 | #4/0 | 112,5 | 40  | 44  | 30,0  | #4/0 | 112,5 |
| 7   | 8   | 200,0 | #4/0 | 75    | 44  | 45  | 40,0  | #4/0 | 45    |
| 8   | 9   | 10,0  | #4/0 | 75    | 38  | 46  | 60,0  | #4/0 | 1     |
| 9   | 10  | 50,0  | #4/0 | 0     | 46  | 47  | 20,0  | #4/0 | 112,5 |
| 10  | 11  | 100,0 | #4   | 0     | 47  | 48  | 120,0 | #4/0 | 0     |
| 11  | 12  | 60,0  | #4   | 8,6   | 48  | 49  | 50,0  | #4/0 | 112,5 |
| 12  | 13  | 30,0  | #4   | 75    | 49  | 50  | 20,0  | #4/0 | 75    |
| 13  | 14  | 160,0 | #4   | 75    | 50  | 51  | 170,0 | #4/0 | 112,5 |
| 11  | 15  | 30,0  | #4   | 112,5 | 48  | 52  | 100,0 | #4/0 | 0     |
| 15  | 16  | 10,0  | #4   | 45    | 52  | 53  | 60,0  | #4   | 1,2   |
| 16  | 17  | 20,0  | #4   | 112,5 | 53  | 54  | 30,0  | #4   | 112,5 |
| 17  | 18  | 40,0  | #4   | 0     | 54  | 55  | 130,0 | #4   | 75    |
| 18  | 19  | 40,0  | #2   | 75    | 52  | 56  | 20,0  | #4   | 75    |
| 19  | 20  | 50,0  | #2   | 112,5 | 56  | 57  | 80,0  | #4   | 0     |
| 18  | 21  | 150,0 | #2   | 112,5 | 57  | 58  | 50,0  | #2   | 10    |
| 10  | 22  | 30,0  | #4/0 | 112,5 | 57  | 59  | 60,0  | #2   | 112,5 |
| 22  | 23  | 70,0  | #4/0 | 0     | 59  | 60  | 20,0  | #2   | 3,8   |
| 23  | 24  | 50,0  | #4   | 3     | 48  | 61  | 40,0  | #4/0 | 3     |
| 24  | 25  | 20,0  | #4   | 45    | 61  | 62  | 10,0  | #4/0 | 5,5   |
| 25  | 26  | 30,0  | #4   | 0     | 62  | 63  | 50,0  | #4/0 | 0     |
| 26  | 27  | 60,0  | #2   | 112,5 | 63  | 64  | 30,0  | #1/0 | 75    |
| 27  | 28  | 40,0  | #2   | 0     | 64  | 65  | 20,0  | #1/0 | 75    |
| 28  | 29  | 20,0  | #2   | 75    | 65  | 66  | 30,0  | #1/0 | 3,5   |
| 29  | 30  | 120,0 | #2   | 112,5 | 66  | 67  | 20,0  | #1/0 | 0     |
| 28  | 31  | 20,0  | #2   | 112,5 | 67  | 68  | 30,0  | #4   | 112,5 |
| 26  | 32  | 20,0  | #4   | 112,5 | 67  | 69  | 20,0  | #4   | 7     |
| 32  | 33  | 5,0   | #4   | 112,5 | 69  | 70  | 20,0  | #4   | 112,5 |
| 33  | 34  | 25,0  | #4   | 112,5 | 67  | 71  | 50,0  | #1/0 | 75    |
| 23  | 35  | 10,0  | #4/0 | 0     | 71  | 72  | 40,0  | #1/0 | 8,5   |
| 35  | 36  | 70,0  | #4/0 | 12,4  | 72  | 73  | 40,0  | #1/0 | 1,9   |
| 36  | 37  | 10,0  | #4/0 | 112,5 | 73  | 74  | 20,0  | #1/0 | 112,5 |
| 74  | 75  | 110,0 | #1/0 | 112,5 | 95  | 96  | 40,0  | #2   | 75    |
| 63  | 76  | 20,0  | #4/0 | 112,5 | 95  | 97  | 50,0  | #2   | 6     |
| 76  | 77  | 30,0  | #4/0 | 5,9   | 105 | 106 | 210,0 | #1/0 | 108,5 |
| 77  | 78  | 50,0  | #4/0 | 0     | 106 | 107 | 30,0  | #1/0 | 0     |
| 78  | 79  | 70,0  | #4/0 | 75    | 107 | 108 | 100,0 | #1/0 | 0     |
| 79  | 80  | 70,0  | #4/0 | 112,5 | 108 | 109 | 100,0 | #4   | 108,5 |
| 80  | 81  | 30,0  | #4/0 | 112,5 | 109 | 110 | 30,0  | #4   | 112,5 |
| 81  | 82  | 30,0  | #4/0 | 0     | 110 | 111 | 20,0  | #4   | 112,5 |
| 82  | 83  | 50,0  | #4   | 75    | 107 | 112 | 170,0 | #4/0 | 75    |
| 82  | 84  | 50,0  | #4/0 | 75    | 112 | 113 | 110,0 | #4/0 | 0     |
| 84  | 85  | 30,0  | #4/0 | 112,5 | 113 | 114 | 110,0 | #4   | 0     |
| 85  | 128 | 20,0  | #4/0 | 0     | 113 | 115 | 200,0 | #4   | 30    |
| 128 | 86  | 30,0  | #4/0 | 15,5  | 115 | 116 | 200,0 | #4   | 30    |
| 86  | 87  | 20,0  | #4/0 | 75    | 116 | 117 | 200,0 | #4   | 30    |
| 78  | 88  | 130,0 | #2   | 75    | 117 | 118 | 200,0 | #4   | 30    |
| 78  | 89  | 50,0  | #4/0 | 75    | 90  | 119 | 110,0 | #2   | 0     |
| 89  | 90  | 50,0  | #4/0 | 0     | 119 | 120 | 70,0  | #4/0 | 0     |
| 90  | 91  | 180,0 | #4/0 | 45    | 120 | 121 | 70,0  | #4/0 | 30    |
| 91  | 92  | 20,0  | #4/0 | 0     | 119 | 122 | 70,0  | #2   | 55    |
| 92  | 93  | 30,0  | #2   | 112,5 | 122 | 123 | 130,0 | #4   | 0     |
| 92  | 94  | 70,0  | #2   | 23,5  | 123 | 124 | 20,0  | #4   | 15,5  |
| 92  | 95  | 100,0 | #4/0 | 0     | 123 | 125 | 20,0  | #4   | 15,5  |
| 97  | 98  | 60,0  | #2   | 0     | 125 | 126 | 40,0  | #4   | 45    |
| 98  | 99  | 110,0 | #4   | 23,5  | 126 | 127 | 40,0  | #4   | 112,5 |
| 98  | 100 | 40,0  | #2   | 75    | 128 | 129 | 60,0  | #2   | 45    |
| 100 | 101 | 110,0 | #2   | 112,5 | 104 | 130 | 70,0  | #1/0 | 0     |
| 95  | 102 | 60,0  | #4/0 | 112,5 | 130 | 131 | 20,0  | #4/0 | 112,5 |

|     |     |       |      |    |     |     |       |      |       |
|-----|-----|-------|------|----|-----|-----|-------|------|-------|
| 102 | 103 | 40,0  | #4/0 | 0  | 130 | 132 | 100,0 | #1/0 | 0     |
| 103 | 104 | 30,0  | #1/0 | 75 | 132 | 133 | 40,0  | #1/0 | 112,5 |
| 103 | 105 | 150,0 | #1/0 | 75 | 133 | 134 | 40,0  | #1/0 | 112,5 |

Fonte: Biscaro (2013)