

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**“Localização de Falhas em Alimentadores de Distribuição
de Energia Elétrica Usando Medições Esparsas de
Tensões”**

RODRIGO APARECIDO FERNANDES PEREIRA

Orientador: Prof. Dr. José Roberto Sanches Mantovani

Tese apresentada à Faculdade de
Engenharia – UNESP – Campus de Ilha
Solteira, para obtenção do título de
Doutor em Engenharia Elétrica.
Área de Conhecimento: Automação.

Ilha Solteira – SP

Março/2007

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação/Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação da UNESP-Ilha Solteira

P4361 Pereira, Rodrigo Aparecido Fernandes.
Localização de faltas em alimentadores de distribuição de energia elétrica usando medições esparsas de tensões / Rodrigo Aparecido Fernandes Pereira. -- Ilha Solteira : [s.n.], 2007
131 p. : il.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de Conhecimento: Automação, 2007

Orientador: José Roberto Sanches Mantovani
Bibliografia: p. 117-120

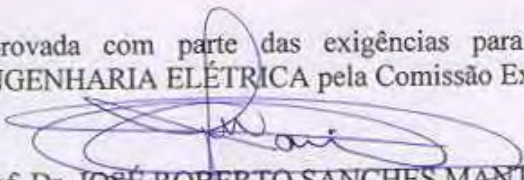
1. Curtos-circuitos – Localização. 2. Energia elétrica – Distribuição. 3. Redes elétricas - Análise. 4. Linhas elétricas.

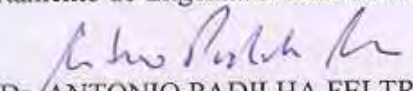
CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

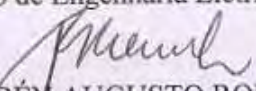
TÍTULO: Localização de Falhas em Alimentadores de Distribuição de Energia Elétrica Usando Medições Esparsas de Tensões

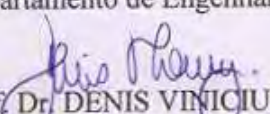
AUTOR: RODRIGO APARECIDO FERNANDES PEREIRA
ORIENTADOR: Prof. Dr. JOSÉ ROBERTO SANCHES MANTOVANI

Aprovada com parte das exigências para obtenção do Título de DOUTOR em ENGENHARIA ELÉTRICA pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. JOSÉ ROBERTO SANCHES MANTOVANI
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

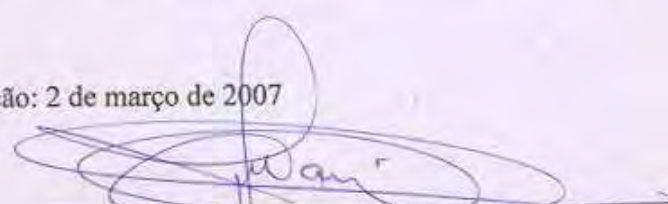

Prof. Dr. ANTONIO PADILHA FELTRIN
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. RUBÉN AUGUSTO ROMERO LÁZARO
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. DENIS VINICIUS COURY
Departamento de Engenharia Elétrica / Escola de Engenharia de São Carlos


Prof. Dr. WALMIR DE FREITAS FILHO
Departamento de Sistemas de Energia Elétrica/Universidade Estadual de Campinas

Data da realização: 2 de março de 2007


Presidente da Comissão Examinadora
Prof. Dr. José Roberto Sanches Mantovani

*Dedico este trabalho aos meus pais, José
Exedito e Pêdra, e às minhas queridas irmãs,
Ana Cristina e Juliana Maria.*

Agradecimentos

A Deus, pela vida.

À minha mãe, Pêdra, e ao meu pai, José Expedito, que sempre me incentivaram e me apoiaram, nunca medindo esforços para que este trabalho fosse concretizado.

Ao professor José Roberto Sanches Mantovani, em especial pelo constante incentivo, pela competência e pela dedicação em suas orientações durante o transcorrer desta pesquisa. Agradeço, ainda, a amizade e a confiança em mim depositadas.

Às minhas queridas irmãs, que sempre estiveram presentes no transcorrer deste trabalho. À Ana Cristina, agradeço especialmente a correção do texto final e à Juliana Maria, as palavras de incentivo nas horas difíceis.

Aos professores Denis Vinícius Coury, Walmir de Freitas Filho, Antonio Padilha Feltrin e Rubén Augusto Romero Lázaro, pelas valiosas sugestões sobre o trabalho final e pelas correções textuais.

Aos professores Jozué Vieira Filho e Luís Fernando Bovolato, pelas sugestões sobre o trabalho apresentado no exame geral de qualificação.

Ao professor Dr. Mladen Kezunovic, do Electrical Engineering and Computer Department, da Texas A&M University, pela oportunidade de trabalhar em seu grupo de pesquisa, bem como pelas orientações durante o período em que naquela instituição permaneci realizando o estágio de doutorado no exterior.

Ao Electrical Engineering and Computer Department, da Texas A&M University, pelo suporte durante a realização do estágio de doutorado no exterior.

Aos alunos de pós-graduação do Power System Control and Protection Lab e aos funcionários da Texas A&M University, agradeço o apoio durante a realização do estágio de doutorado no exterior.

À Graziella, pelo carinho, apoio, compreensão e incentivo em muitos momentos, durante o transcorrer desta pesquisa.

Aos amigos do Laboratório de Planejamento de Sistemas de Energia Elétrica – LaPSEE.

Ao Deoclécio Kosaka e ao José Roberto Campos, pelo suporte em informática, tão necessário a este trabalho.

A todos os amigos e colegas do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica que, de algum modo, colaboraram nesta pesquisa.

Aos docentes e funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica e da Seção de Pós-graduação da FEIS/UNESP que, direta ou indiretamente, colaboraram para a realização deste trabalho.

Ao bibliotecário João Josué Barbosa, pela ajuda com as referências bibliográficas.

Aos funcionários da CAPES responsáveis por meu processo da bolsa de estágio de doutorado no exterior, pela competência e auxílio prestado durante a realização do mesmo.

A FEPISA, pelo apoio financeiro através da bolsa de doutorado no país (processo nº 007/2005), e a CAPES, pelo apoio financeiro através das bolsas de doutorado no país e de estágio de doutorado no exterior (processo nº BEX 0769/05-3).

A todos aqueles, enfim, que contribuíram de alguma forma para que este projeto de pesquisa se realizasse.

Sumário

1 LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM ALIMENTADORES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.....	12
1.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
1.2 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO.....	21
2 FLUXO DE POTÊNCIA E MODELOS DE CARGAS PARA REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.....	24
2.1 FLUXO DE POTÊNCIA.....	24
2.1.1 Fluxo de potência para redes trifásicas.....	25
2.2 MODELOS DAS CARGAS.....	28
2.2.1 Modelo de carga de potência constante.....	29
2.2.2 Modelo de carga de impedância constante.....	30
2.2.3 Modelo de carga de corrente constante.....	30
2.2.4 Modelo combinado de carga.....	31
2.3 REDEFINIÇÃO DOS MODELOS PARA CARGAS EM ESTRELA OU DELTA.....	32
2.3.1 Cargas conectadas em estrela.....	32
2.3.2 Cargas conectadas em delta.....	32
2.4 ALTERAÇÕES NAS EQUAÇÕES DO FLUXO DE POTÊNCIA PARA CONSIDERAR CARGAS DE IMPEDÂNCIA CONSTANTE, DE CORRENTE CONSTANTE E MISTAS.....	33
3 TÉCNICA PROPOSTA PARA LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM ALIMENTADORES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.....	35
3.1 MEDIÇÕES NO NÓ INICIAL DO ALIMENTADOR.....	36
3.2 MEDIÇÕES ESPARSAS DE TENSÕES AO LONGO DO ALIMENTADOR.....	37
3.3 POTÊNCIA COMPLEXA NO NÓ INICIAL DO ALIMENTADOR.....	38
3.4 ESTIMATIVA DA POTÊNCIA PRÉ-FALTA DOS TRANSFORMADORES DE DISTRIBUIÇÃO.....	38
3.5 CÁLCULO DOS DESVIOS ENTRE AS TENSÕES MEDIDAS E SIMULADAS DURANTE A FALTA PARA OS PONTOS DE MEDIÇÃO.....	40
3.6 ALGORITMO PARA LOCALIZAÇÃO DE FALTAS.....	42
4 ALOCAÇÃO OTIMIZADA DE MEDIDORES DE TENSÃO PARA LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM ALIMENTADORES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.....	44
4.1 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DO PROBLEMA DE ALOCAÇÃO OTIMIZADA DE MEDIDORES DE TENSÃO.....	45
4.2 ALGORITMOS GENÉTICOS.....	48
4.2.1 Seleção.....	49
4.2.2 Recombinação.....	50
4.2.3 Mutação.....	51
4.2.4 Parâmetros de Controle.....	51
4.2.5 Critério de Parada.....	52
4.3 ALGORITMO GENÉTICO DEDICADO À ALOCAÇÃO DE MEDIDORES DE TENSÃO EM ALIMENTADORES DE DISTRIBUIÇÃO.....	52
4.3.1 Estrutura de Representação dos Cromossomos.....	53
4.3.2 Geração da População Inicial.....	53
4.3.3 Função de Adaptação.....	53
4.3.4 Seleção.....	54
4.3.5 Recombinação e mutação.....	54
4.3.6 Parâmetros de Controle.....	54
4.3.7 Estratégia de Diversificação.....	54
4.3.8 Critério de Convergência.....	55
4.3.9 Diagrama de Blocos do AG Implementado.....	55
5 RESULTADOS.....	57
5.1 CONDIÇÕES DE TESTES.....	57
5.2 CRITÉRIOS PARA ANÁLISE DE RESULTADOS.....	59

5.3	DESCRIÇÃO, RESULTADOS E DISCUSSÕES DOS TESTES REALIZADOS.....	59
5.3.1	<i>Influência da resistência de falta na precisão do algoritmo sob condições ideais de carregamento</i>	60
5.3.2	<i>Influência da resistência de falta e do modelo de cargas na precisão do algoritmo</i>	61
5.3.3	<i>Influência da resistência de falta, do modelo de cargas e da proposta para estimativa do carregamento dos transformadores na precisão do algoritmo</i>	67
5.3.4	<i>Influência da resistência de falta, do modelo combinado das cargas e da proposta para estimativa do carregamento dos transformadores na precisão do algoritmo</i>	77
5.3.5	<i>Comentários gerais sobre os testes 1 a 21</i>	100
5.4	RESULTADOS DA ALOCAÇÃO OTIMIZADA DOS MEDIDORES	101
5.4.1	<i>Análise do impacto da alocação otimizada dos medidores de tensão no algoritmo de localização de faltas proposto</i>	102
5.5	ANÁLISE DA APLICAÇÃO DO ALGORITMO DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS PROPOSTO PARA FALTAS BIFÁSICAS E TRIFÁSICAS COM E SEM CONTATO COM A TERRA.....	106
6	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	114
	REFERÊNCIAS	117
	APÊNDICE A – DADOS DO ALIMENTADOR	121
	APÊNDICE B – ARQUIVOS DE DADOS DO ATP	126
	APÊNDICE C – RESUMOS DOS ARTIGOS PUBLICADOS	129

Resumo

Neste trabalho, é proposto um algoritmo para localização de faltas em alimentadores radiais aéreos de distribuição de energia elétrica. A técnica proposta aplica-se a alimentadores trifásicos com cargas desequilibradas, que podem possuir ramais laterais trifásicos, bifásicos e monofásicos. As equações da rede que compõem esta técnica foram desenvolvidas com base nos métodos de fluxo de potência do tipo varredura (*backward/forward sweep*), o que a torna uma ferramenta eficiente e de baixo esforço computacional. No desenvolvimento da mesma, considera-se que haja disponibilidade de medições de tensões no nó inicial do alimentador e também medições esparsas de tensão em alguns pontos ao longo do alimentador de distribuição. Esta técnica apresenta algumas vantagens quando comparada com as técnicas convencionais para localização de faltas que utilizam o deslocamento do local da falta na rede. Nela eliminam-se, dos possíveis locais de falta, os pontos que estão em ramais laterais geograficamente distantes do verdadeiro local da falta e que poderiam ser indicados pelos métodos convencionais de localização da faltas. Adicionalmente à técnica para localização de faltas, é proposto um modelo matemático de programação binária para fazer a alocação otimizada de medidores esparsos de tensões ao longo do alimentador com o propósito de melhorar a precisão do algoritmo desenvolvido, a partir da técnica proposta para a localização de faltas. Neste modelo matemático, busca-se manter a melhor relação custo-benefício para as

empresas de energia, em termos de investimentos, custos operacionais e melhorias dos seus índices de confiabilidade, com a localização eficiente de faltas em suas redes de distribuição. Para a solução deste modelo matemático, propõe-se um algoritmo genético dedicado. A fim de validar a eficiência do modelo e da técnica de solução propostos para o problema de alocação otimizada de dispositivos de medição de tensão e do algoritmo para localização de faltas em redes de distribuição, são apresentados os resultados e as análises das simulações realizadas em um alimentador de distribuição de 13,8 kV e 134 nós, pertencente a um sistema real de distribuição de médio porte.

Abstract

An algorithm for fault location on overhead and radial electric power distribution feeders is proposed in this work. The proposed technique is able to be applied to three-phase feeders containing unbalanced loads. Also, the proposed technique has the ability to deal with feeders which has three-, two- or single-phase laterals. Equations that describe the network are derived based on the backward/forward sweep load flow methods. This characteristic makes the proposed fault location technique an efficient and fast computational tool. In order to develop this technique, it was considered that voltage measurements are available at the sending node of the feeder, as well sparse voltage measurements at some places on the feeder. Thus, this technique presents some advantages in comparison to the traditional technique for fault location which finds the faulty point by means of sliding the analyzed point on the network. By using traditional techniques, points located geographically far from the actual faulty point can be indicated as a faulty point. The proposed technique eliminates these points from the results. Additionally to the proposed technique, a binary programming model is presented for carrying out the optimized placement of voltage measurement devices along the feeder. The goal of this binary programming model is to enhance the accuracy of the proposed algorithm for fault location. This mathematical model is aimed at keeping the best cost-benefit rate for the electric utilities, in terms of operational costs and improvements of

reliability indices by means of an efficient fault location. A dedicated genetic algorithm is proposed for solving the optimization model. Results and simulation analyses are presented in order to validate the efficiency of the mathematical model and the genetic algorithm proposed for optimized placement of voltage measurement devices, as well as the proposed algorithm for fault location. For these purposes a real-life, overhead, 13.8 kV and 134-node feeder was used.

1 Localização de faltas em alimentadores de distribuição de energia elétrica

A mudança do modelo de monopólio para o modelo competitivo impôs novas filosofias de operação e planejamento dos sistemas elétricos de potência, envolvendo a geração, a transmissão e a distribuição de energia elétrica. Com essas mudanças, o setor elétrico mundial migrou de um ambiente centralizado e regulamentado para um novo ambiente descentralizado, no qual as empresas do setor têm suas estruturas de operação e planejamento alteradas e passam a desempenhar papéis competitivos na busca de eficiência econômica e qualidade de fornecimento de energia.

A transição de um modelo para o outro exige o desenvolvimento de novos métodos para análise, planejamento e operação dos sistemas de energia elétrica. Esses métodos devem, portanto, buscar mecanismos que, observados os padrões de qualidade e confiabilidade estabelecidos pelo mercado consumidor e agências reguladoras, garantam, ao setor de energia elétrica, a otimização do retorno de investimentos. A energia elétrica sob os interesses das empresas distribuidoras deve ser tratada como um produto que precisa ser comercialmente competitivo, com qualidade e confiabilidade de fornecimento.

Nos últimos anos, essa competitividade no mercado de energia elétrica e a crescente exigência das agências reguladoras do setor para as distribuidoras de energia elétrica, quanto à

manutenção da qualidade nos seus índices de fornecimento, têm feito com que sejam pesquisadas técnicas e equipamentos de controle e medição para melhorar os índices de confiabilidade dos sistemas de energia. Uma das formas de melhorar esses índices é através da rápida e eficiente localização de faltas na rede de distribuição. Esse problema tem merecido a atenção dos pesquisadores das áreas de planejamento, confiabilidade e operação de sistemas de energia elétrica, sendo um tema amplamente investigado em vários centros de pesquisas, ao longo dos anos, com a proposição de técnicas e resultados que mostram a necessidade de novos investimentos e novos estudos relacionados com o mesmo.

Dentre as principais dificuldades encontradas pela grande maioria das técnicas propostas para a localização das faltas em alimentadores aéreos de distribuição e que, de certa forma, prejudicam a precisão e a qualidade dos resultados práticos, estão a topologia e as variações nas impedâncias da rede devido à reconfiguração, existência ou não de co-geração no sistema de distribuição e aos níveis de cargas – que se refletem diretamente nas correntes e tensões pré-falta –, as seções da rede com condutores de diferentes bitolas e o conhecimento exato da impedância do sistema que se encontra atrás da subestação [1].

Na literatura, encontram-se vários trabalhos relacionados com a localização de faltas em alimentadores de distribuição de energia elétrica [1] – [5], [7], [9] – [23]. As propostas para localização dessas faltas diferem-se basicamente quanto ao método ou técnica utilizado, ao número de variáveis e à instrumentação utilizada no processo de localização de faltas. Quanto maior for a quantidade de informações relativas à rede elétrica e às condições operacionais do estado da rede pré e pós faltas utilizadas, mais precisos serão os resultados e maior será a complexidade da técnica ou método para a localização de faltas.

A escolha de uma técnica ou método para localização de faltas para ser implantado em uma empresa distribuidora de energia está, assim, relacionada com a disponibilidade de equipamentos de medição e controle existentes na rede e com o planejamento da empresa em investir na aquisição de novos equipamentos e *software* necessários. Desta forma, na tomada de decisão deve-se buscar uma relação custo-benefício adequada, considerando, entre outros fatores, os recursos financeiros para investimento e os benefícios proporcionados tanto para a distribuidora – redução de custos envolvidos na localização de faltas e reparos na rede, fornecendo um produto de qualidade – como para os clientes – manutenção da qualidade do fornecimento e dos serviços e redução dos tempos de interrupção do fornecimento.

No problema de localização de faltas em redes de distribuição, de forma geral, estão envolvidos vários subproblemas, dentre os quais se destacam: os projetos de instrumentação e de *hardware* relacionados com a aquisição de sinais elétricos e especificação de dispositivos

de controles e medição; o desenvolvimento de *software* relacionado com o tratamento digital de sinais elétricos e algoritmos computacionais para localização de faltas.

Embora normalmente todos esses subproblemas estejam inter-relacionados, podem-se, de certa forma, tratar isoladamente os projetos de *hardware* e *software*. Neste trabalho, aborda-se o projeto de *software*, com o desenvolvimento de uma técnica para localização de faltas em redes de distribuição, baseada na utilização de dados de medições esparsas de tensão e na alocação otimizada dos dispositivos de medição de tensão no alimentador.

A técnica ora proposta é baseada nos métodos de localização de faltas propostos em [2] – [5] e [7], os quais se mostram como soluções eficientes quando estão disponíveis medições de tensões e correntes. Nela as grandezas elétricas utilizadas são os fasores de pré e durante a falta das tensões e correntes medidas na subestação, e as magnitudes das tensões durante a falta medidas em um conjunto reduzido de nós do alimentador.

Além disso, em conjunto com essas grandezas elétricas, uma base de dados com as características elétricas e operacionais das redes de distribuição é empregada para processar o programa de cálculo de fluxo de potência pré e durante a falta. Esse cálculo de fluxo de potência é executado considerando que a corrente estimada para a falta é injetada em cada um dos nós do alimentador, isto é, são executados tantos fluxos de potência quanto forem os números de nós do alimentador.

Para cada um dos fluxos de potência executados, deste modo, são calculadas as tensões para os nós em que existem medidores de tensão instalados. A indicação do local da falta é obtida comparando os valores de tensões medidos e simulados, isto é, o provável nó em falta é aquele que fornece a menor diferença entre as tensões medidas e simuladas para todos os pontos de medição. Os fasores tensão e corrente medidos no nó inicial do alimentador podem ser obtidos, por exemplo, através da técnica da transformada discreta de Fourier, e utilizam-se os valores *RMS* (*Root Mean Square*) para representar a magnitude das tensões.

A detecção do tipo de falta, a aquisição e o tratamento digital dos sinais elétricos são considerados como dados e informações básicas para o algoritmo proposto, e não são objetos de estudo deste trabalho. A técnica aqui proposta apresenta algumas vantagens quando comparada com os métodos convencionais que utilizam o deslocamento do local da falta na rede. Eliminam-se, assim, dos possíveis locais de falta, os pontos que estão em ramais laterais geograficamente distantes do verdadeiro local da falta e que poderiam ser indicados pelos métodos convencionais de localização das faltas.

Na alocação otimizada de medidores que fornecem os dados para o algoritmo de localização de faltas, é proposto um modelo matemático de programação binária com o propósito de melhorar a precisão da localização de faltas e manter a melhor relação custo-benefício para as empresas de energia [6], [8]. Nesse modelo, utiliza-se uma técnica de localização de faltas similar à apresentada em [7], mas através de uma abordagem trifásica da rede para avaliar a função de adaptação. Essa abordagem trifásica permite tratar o problema da alocação de medidores de forma mais genérica e realista, além de considerar as correntes das cargas de forma estocástica para cada fase da rede de distribuição.

Para validar a eficiência do modelo e da técnica de solução propostos para o problema de alocação otimizada de medidores de tensão e do algoritmo para localização de faltas, apresentam-se os resultados e as análises das simulações realizadas em um alimentador de distribuição de 13,8 kV e 134 nós, pertencente a um sistema real de distribuição de médio porte.

1.1 Revisão Bibliográfica

Resumos e uma breve análise dos artigos que discutem as principais técnicas e métodos de localização de faltas pesquisados durante o desenvolvimento desta pesquisa são apresentados nesta seção. Na literatura, encontra-se uma grande variedade de trabalhos relacionados com este tema, analisado por meio de diferentes técnicas. Desta forma, nesta seção apresentam-se apenas os trabalhos que utilizam fasores de frequência fundamental e análise de circuitos elétricos, desenvolvidos e publicados a partir de 1991.

Lehtonen et al.(1991) [9] apresentam duas abordagens diferentes para a localização de faltas em alimentadores de distribuição de energia elétrica. A primeira delas é baseada em medições simultâneas de tensões e correntes na subestação (secundário do transformador ou no nó inicial do alimentador), e somente a reatância da linha é utilizada no cálculo da distância da falta à subestação. As cargas são modeladas considerando sua dependência com a variação de tensão. De acordo com os autores, o uso dessa técnica baseada na reatância da linha minimiza os efeitos da resistência de falta na precisão dos resultados para a localização de faltas.

A segunda abordagem, por sua vez, é baseada na hipótese de que somente as correntes de faltas medidas estão disponíveis. Essa hipótese faz com que esta abordagem apresente precisão inferior à primeira, e o valor da resistência de falta deve ser considerado nos cálculos. O valor da resistência de falta é estimado com base nos valores da corrente de falta e

no comprimento do arco voltaico formado entre as fases em falta ou entre uma fase e um ponto neutro da rede. Porém, devido à dificuldade em conhecer o exato comprimento do arco, os erros presentes na estimativa do valor da resistência de falta, na maioria das vezes, afetam a precisão deste método. Para ambas as abordagens, as grandezas elétricas são registradas com uma frequência de amostragem de 500 Hz, e os fasores de frequência fundamental dessas grandezas são extraídos das amostras através da aplicação da Transformada Discreta de Fourier (*DFT – Discrete Fourier Transform*).

Girgis e Fallon (1992) [10] apresentam uma técnica para localização de faltas em linhas de transmissão radiais com várias derivações de cargas e dados medidos disponíveis somente para o nó inicial do alimentador. Um novo conceito de impedância aparente modificada é desenvolvido. Para desenvolver o modelo de impedância aparente, consideram-se as correntes das cargas e os dados trifásicos das cargas e da rede elétrica, decompostos através de componentes simétricos e no domínio das fases. Quando um distúrbio é detectado, os fasores das correntes e tensões são obtidos, e as alterações nas magnitudes dos fasores das correntes são utilizadas para classificar o tipo de falta e selecionar as fases em falta.

Após a classificação do tipo de falta e a detecção das fases envolvidas na mesma, a impedância aparente é calculada. Compara-se a parte imaginária da impedância aparente calculada com a parte imaginária da impedância do alimentador e obtém-se a estimativa do local da falta. Para que se tenha uma estimativa desse local com aceitável grau de precisão, a presença de ramais laterais deve ser considerada. Através dos dados fornecidos pelo fluxo de potência e pelos fasores tensão e corrente pré-falta medidos, a potência ativa e a reativa, bem como a magnitude da tensão nos nós com cargas, são usadas para calcular a admitância equivalente das cargas para a condição de falta. As impedâncias séries para cada seção de linha são calculadas por meio do conhecimento das características construtivas das redes e são empregadas para calcular a queda de tensão em cada seção de linha. As tensões e correntes durante a falta são estimadas usando as tensões e correntes medidas e as admitâncias equivalentes das cargas.

Girgis et al. (1993) [11] propõem uma técnica de localização de faltas para alimentadores de distribuição rurais usando tensão e corrente medidos em um único ponto. No esquema para localização de faltas, busca-se considerar os múltiplos ramais laterais, as condições de desequilíbrio nas fases e a natureza assimétrica dos alimentadores de distribuição. Usa-se um algoritmo de estimação ótima recursivo para obterem-se os fasores de frequência fundamental das tensões e correntes. A distância da falta à subestação é calculada pelo emprego de um método baseado na abordagem da impedância aparente, bem como dos

fasores tensão e corrente estimados. O procedimento para a localização de faltas apresentado neste artigo é o mesmo proposto em [10], porém considerações são feitas para que faltas em ramais laterais sejam localizadas.

Das, Sachdev e Sidhu (1995) [12] apresentam uma técnica para localização de faltas baseada em componentes de frequência fundamental de tensões e correntes medidas no nó inicial do alimentador. Segundo os autores, a técnica proposta é adequada para ser utilizada em redes não-homogêneas que possuem bancos capacitivos, derivações com cargas variáveis e ramais laterais. Basicamente, esta técnica para localização de faltas consiste em obter os fasores de frequência fundamental das tensões e correntes medidos no nó inicial do alimentador durante a falta.

Os fasores de frequência fundamental das tensões e correntes são estimados e o tipo de falta é determinado, de forma *on-line*, após um intervalo de tempo pré-definido. Os dados pré-falta e de falta, assim como os parâmetros das linhas e cargas, que são armazenados em um banco de dados, são usados para estimar o local da falta em um módulo de processamento *off-line*. As cargas são modeladas considerando suas dependências com a variação de tensão e os parâmetros que descrevem a relação admitância-tensão são calculados através dos valores pré-falta das correntes e tensões nas cargas. As equações do algoritmo de localização de faltas utilizam grandezas baseadas em componentes simétricos e no domínio das fases. Em 1997 e 2000, os mesmos autores publicaram outros dois trabalhos, [13] e [14], que são baseados nos mesmos princípios apresentados em [12].

Aggarwal, Aslan e Johns (1997) [15] propõem uma técnica baseada no conceito de componentes superpostos das tensões e correntes, utilizando medições em um único ponto para localização de faltas em alimentadores aéreos de distribuição. De acordo com os autores, a técnica proposta para localização de faltas é altamente insensível com relação às variações da impedância da fonte e da presença de derivações com cargas variáveis.

O algoritmo desenvolvido é baseado no princípio da extração da tensão superposta (diferença entre a tensão total de falta e a tensão pré-falta em regime permanente) dos fasores das tensões medidas para as condições pré-falta e de falta, para qualquer ponto assumido em falta. Essa tensão é, então, injetada no ponto assumido como sendo aquele em falta para calcular as correntes nas fases que não estão presentes na falta. No equacionamento desenvolvido, considera-se a análise trifásica das redes e de seus elementos, bem como o emprego de um modelo adequado para as cargas.

Os mesmos autores, em outro artigo [16], detalham e explicam melhor a técnica e as equações desenvolvidas nesse primeiro, assim como aspectos técnicos envolvidos na aquisição dos dados usados pelo algoritmo de localização de faltas.

Zhu et al. (1997) [17] apresentam uma técnica que tem como mais importante diferencial a localização de faltas baseada totalmente na análise trifásica das redes e de seus componentes. Esta técnica para localização e diagnóstico de faltas em alimentadores de distribuição é baseada na integração de informações disponíveis pelos registradores de faltas com o conhecimento das características topológicas e operacionais do alimentador, bem como nos dados armazenados na base de dados. O algoritmo proposto fundamenta-se em análises de regime permanente e em condições de falta. Para lidar com as incertezas inerentes aos modelos dos componentes da rede e na estimação dos fasores, o algoritmo foi adaptado para estimar regiões em falta com base em modelos e análise probabilística.

Considerando que o alimentador de distribuição tem topologia radial e ramificada, múltiplas possibilidades de pontos em falta podem ser encontradas usando-se medições somente no nó inicial do alimentador. O algoritmo tem habilidade para selecionar e classificar os possíveis pontos em falta através da análise de várias evidências, tais como: casamento de formas de ondas de correntes e análise da potência rejeitada devido à atuação de um dispositivo de proteção. Além disso, no procedimento para localização de faltas, consideram-se os fasores tensão e corrente de frequência fundamental, que são medidos no nó inicial do alimentador, e também modelos adequados para as linhas e cargas. O provável ponto em falta é indicado usando um processo iterativo em conjunto com um esquema de diagnóstico de faltas baseado no casamento de formas de ondas.

Lehtonen et al. (2001) [18] propõem o uso de três diferentes fontes de informações que podem ser utilizadas para propósitos de localização de faltas. Essas fontes de informações seriam os indicadores de faltas instalados em pontos de ramais da rede, a distância calculada da falta à subestação e os dados estatísticos de frequências de faltas para diferentes seções da rede. Assim, compara-se a corrente de falta medida com a calculada e a distância entre a subestação e o local de incidência da falta pode ser estimada. Por meio da combinação dessa informação com os dados obtidos pelos indicadores de falta, o local da falta é determinado.

Na ausência de dados, as informações estatísticas de frequências de faltas no alimentador são usadas. O cálculo da distância entre a subestação e o ponto de incidência da falta é baseado na reatância obtida através da medição dos fasores tensão e corrente. Para melhorar a precisão no cálculo da distância da falta, as cargas são modeladas considerando a dependência com a tensão aplicada em seus terminais. Além disso, uma modelagem

estatística para avaliar a possibilidade de falhas dos indicadores de faltas também é utilizada pelo algoritmo de localização de faltas.

Pereira (2003) [4] e Pereira *et al.* (2004) [5] apresentam uma técnica de localização de faltas que utiliza os fasores tensão e corrente medidos no nó inicial do alimentador e os valores *RMS* das tensões medidas para alguns nós do alimentador para efetuar a localização do ponto em falta. No equacionamento da técnica, utilizam-se as grandezas elétricas da rede decompostos através de componentes simétricos e no domínio das fases, e o modelo estático de impedância constante é usado para as cargas. Para a localização da falta, simulam-se faltas em todos os pontos de interesse do alimentador, e, para cada falta simulada, os valores das tensões são calculados para os nós onde estão disponíveis as medições de tensão. Assim, os valores de tensão medidos e simulados são comparados, fornecendo a indicação do provável local da falta.

Lee et al. (2004) [19] apresentam um algoritmo para localização de faltas em conjunto com um esquema de diagnóstico de faltas. Nesta proposta, primeiramente os prováveis locais da falta são identificados através da estimação iterativa das correntes de cargas e da corrente de falta para cada seção da linha. O verdadeiro local da falta é, então, determinado por meio da aplicação de regras de comparação de padrões de correntes. Se necessário, uma análise da carga interrompida pela atuação de um dispositivo de proteção para eliminação da falta é efetuada com base em valores medidos e simulados. A técnica é baseada em fasores de frequência fundamental das tensões e correntes medidos no nó inicial do alimentador. As equações utilizadas no processo de localização de faltas são obtidas através de análises no domínio das fases, e as cargas são modeladas considerando a dependência com a tensão aplicada em seus terminais.

Senger et al. (2005) [20] apresentam o desenvolvimento e os resultados de simulações e de testes práticos de um sistema automático para localização de faltas em redes de distribuição primárias. Tal sistema é baseado em medições provenientes de dispositivos eletrônicos inteligentes (*IED*) equipados com função de oscilografia, que são instalados nos nós iniciais dos alimentadores, e também em bancos de dados contendo informações sobre a topologia e os parâmetros do alimentador. Os fasores pré-falta e de falta são estimados por um módulo *DSP* (*Digital Signal Processing*), aplicando a transformada discreta de Fourier, o qual, após a identificação do instante da falta, emprega duas janelas de dados: uma para a região pré-falta do sinal amostrado e a outra para a região em falta do sinal amostrado. Equações baseadas em grandezas no domínio das fases e na modelagem adequada das cargas

são empregadas no método de localização de faltas, que é muito similar aos anteriormente apresentados em [17] e [19].

Li, Mokhar e Jenkins (2005) [21] propõem uma técnica que combina um programa de análise de sistemas de potência, um método de busca em base de dados e uma técnica de reconhecimento de padrões para identificar, de forma automática, uma seção sob falta em alimentadores de distribuição. Nesta técnica, utiliza-se um programa de análise trifásica de faltas e fluxo de potência desbalanceado para, analiticamente, gerar a base de dados com os afundamentos de tensão para faltas em todos os nós da rede. Os algoritmos para busca na base de dados e reconhecimento de padrões foram desenvolvidos para identificar a seção em falta quando uma falta ocorre em qualquer ponto do alimentador.

O método é baseado no princípio de que todos os nós da rede podem sofrer um afundamento de tensão quando uma falta ocorre no alimentador. Além da magnitude do afundamento de tensão, a alteração do ângulo de fase também é utilizada no processo de localização da falta. Quando uma falta ocorre no alimentador, a tensão é medida no nó inicial do alimentador da subestação. O valor *RMS* da tensão e a alteração do ângulo de fase são extraídos das amostras dos sinais medidos. Esses valores provenientes das medições são comparados com os valores armazenados na base de dados de afundamentos de tensão. Através das comparações, várias seções contendo o provável local da falta podem ser encontradas e, desse modo, o algoritmo de reconhecimento de padrões determina qual delas contém o verdadeiro local da falta.

Gohokar e Khedkar (2005) [22] propõem um método de localização de faltas, para alimentadores de distribuição automatizados, que utiliza informações de tensão e corrente obtidas nos nós iniciais e finais de todas as seções consideradas. Desta forma, na ocorrência de uma falta no alimentador de distribuição, através da comparação das magnitudes dos sinais de corrente obtidos em todas as seções, a zona em falta é imediatamente identificada. A comparação da magnitude das correntes para todas as seções mostra que a falta está naquela em que o transformador de corrente do nó inicial detecta uma corrente de falta e, no nó final, detecta uma corrente normal de carga.

Essa condição particular é definida pelos símbolos 1 (corrente de falta) e 0 (corrente de carga), e o monitoramento constante de todos os transformadores de corrente é executado. Em situações normais, isto é, quando não existe uma falta na rede, a leitura dos transformadores de corrente é dada como sendo 0. Assim, durante uma falta, a seção em falta apresentará leitura 1 (para o nó mais perto da subestação) e leitura 0 (para o nó mais longe da subestação). As demais seções apresentarão leituras 1 e 1 ou 0 e 0. Quando se consideram

ramais laterais, podem aparecer algumas seções apresentando leituras 1 e 0 e deve-se fazer a atualização das correntes e tensões. Para isso, utiliza-se um modelo de carga estática de impedância constante para a condição de falta. Desta forma, o ramal lateral com maior queda de tensão é considerado como sendo o ramal em falta.

Won *et al.* (2006) [23] apresentam um algoritmo para localizar fontes de eventos que podem alterar a qualidade da energia e do fornecimento. Este algoritmo é baseado na instalação de medidores de tensão e corrente em vários pontos do alimentador. Quando uma falta ocorre no alimentador, utilizam-se as informações dos medidores de corrente para identificar o caminho desde a subestação até a seção em falta. Essa identificação é feita através de um algoritmo desenvolvido que emprega conceitos de grafos orientados. Quando o alimentador apresenta ramais laterais, os quais podem fornecer a identificação de várias seções candidatas a ser a seção em falta, as informações de tensões e correntes das cargas são utilizadas para escolher, dentre essas seções, a mais provável sob falta.

Observa-se que esta proposta não especifica um local para a falta dentro da seção, e sim uma seção em falta. Para testar o algoritmo, foi utilizado o alimentador IEEE de 34 nós, sendo considerados, nos testes, 26 pontos de monitoramento de tensão e corrente no alimentador.

Pereira *et al.* (2006) [7] propõem melhorias nos trabalhos apresentados em [4] e [5]. Tais melhorias estão relacionadas com o uso de modelagem trifásica da rede de distribuição e de seus componentes, na análise da robustez e eficiência do algoritmo de localização de faltas frente a variações na estimativa das cargas durante o processo de localização da falta, e, ainda, no processo de seleção do provável local da falta. Assim, o algoritmo proposto pode ser aplicado a redes desbalanceadas e desequilibradas, que podem, além disso, apresentar ramais laterais monofásicos ou bifásicos.

1.2 Organização do Texto

O presente trabalho foi organizado em seis capítulos. Este primeiro é introdutório e apresenta o problema estudado, a técnica e os objetivos desta tese, além da revisão bibliográfica. A ele somam-se os seguintes:

O Capítulo 2 apresenta e especifica o algoritmo de fluxo de potência *backward/forward sweep* trifásico que serviu de base para o desenvolvimento da técnica proposta para localização de faltas em alimentadores aéreos de distribuição. Além disso, os diferentes modelos de cargas (potência constante, impedância constante, corrente constante e

combinado), os quais podem ser utilizados no processo de localização de faltas, também são discutidos e detalhados.

O Capítulo 3 apresenta a metodologia adotada neste trabalho para localização de faltas em alimentadores radiais aéreos de distribuição, baseada no uso de medição esparsa de tensão ao longo do alimentador. Os aspectos teóricos e computacionais desta metodologia são discutidos com ênfase na característica estocástica do problema de localização de faltas em redes de distribuição.

O Capítulo 4 propõe um modelo matemático para alocação otimizada de dispositivos de medição de tensão no alimentador de distribuição, com vistas a melhorar a eficiência da técnica de localização de faltas abordada no capítulo anterior. Ademais, são apresentados os conceitos teóricos e computacionais do algoritmo de otimização combinatória, pesquisado para alocação de dispositivos de medição de tensão em alimentadores de distribuição - Algoritmo Genético (AG).

No Capítulo 5, são apresentados os resultados obtidos com o algoritmo proposto para localização de faltas através de testes exaustivos para mostrar a eficiência da técnica proposta, considerando-se os medidores de tensão alocados de forma heurística no alimentador. As faltas a serem localizadas são simuladas através do *software* ATP (*Alternative Transient Program*), considerando-se aleatoriamente diferentes condições de faltas às quais um alimentador em operação pode estar sujeito. Tendo em vista as condições de testes mais realistas, são apresentados também resultados da alocação otimizada de medidores de tensão e localização de faltas, a fim de mostrar as melhorias na eficiência do algoritmo proposto quando os medidores são alocados de forma otimizada na rede. São mostrados, ainda, resultados da localização de outros tipos de faltas no alimentador para essas condições mais realistas de testes.

Comentários, possíveis encaminhamentos do trabalho e discussões que, eventualmente, possam ser empreendidas por intermédio dos testes realizados são apresentados no Capítulo 6.

No Apêndice A, evidenciam-se os dados do alimentador real de distribuição utilizado nos testes do algoritmo de localização de faltas. No Apêndice B, são apresentadas algumas partes dos arquivos de dados utilizados nas simulações com o ATP. O primeiro arquivo está relacionado com a simulação das condições pré-falta, para obtenção das grandezas em regime permanente. O segundo arquivo, por sua vez, está relacionado com a simulação da falta a ser localizada, para a obtenção das grandezas durante essa falta. Considera-se, porém, regime permanente para a falta, tendo em vista que o objetivo principal deste trabalho de pesquisa é a

proposta de uma técnica e de um algoritmo para localização de faltas, e não a aquisição e o tratamento dos sinais das grandezas elétricas utilizadas como dados de entrada para a técnica de localização proposta. Assim, os transitórios decorrentes da falta não foram considerados nas simulações (todas as faltas foram simuladas desconsiderando o transitório). No Apêndice C, por fim, são apresentados os resumos dos trabalhos publicados durante a realização desta pesquisa.

2 Fluxo de potência e modelos de cargas para redes de distribuição de energia elétrica

Neste capítulo, apresenta-se a técnica de cálculo de fluxo de potência para redes trifásicas desequilibradas do tipo varredura baseada na soma das correntes. A técnica proposta para localização de faltas em redes de distribuição é desenvolvida com base nesse algoritmo de fluxo de potência. Num alimentador de distribuição podem estar conectados consumidores com diferentes perfis de consumo (comerciais, residenciais e industriais), e as suas cargas variam aleatoriamente ao longo do dia. Essas cargas devem ser modeladas de formas diferentes para que sejam obtidos resultados próximos das condições operacionais reais do alimentador, por meio da técnica para localização de faltas proposta. Desta forma, apresenta-se também, neste capítulo, o equacionamento de modelos de cargas utilizados pelo algoritmo de localização de faltas.

2.1 Fluxo de Potência

As redes de distribuição apresentam características particulares que as diferenciam das redes de transmissão. Na maioria das vezes, as redes de distribuição apresentam topologia radial ou, em alguns casos, fracamente malhada, ramais trifásicos, bifásicos ou monofásicos,

cargas dos mais variados tipos, relação X/R baixa e ausência de transposição. Dadas essas características, métodos clássicos desenvolvidos, em especial considerando as características das redes de transmissão para cálculo de fluxo de potência, podem não ser apropriados para a análise das redes de distribuição, principalmente devido aos problemas relacionados com a dificuldade de convergência. Várias técnicas e vários algoritmos para análise de fluxo de potência em redes de distribuição de energia elétrica são propostos na literatura, entre eles se podem citar as propostas apresentadas em [24] e [25].

Tendo em vista as características e o enfoque proposto para o desenvolvimento de uma técnica de localização de faltas para sistemas de distribuição com baixo nível de automação, típicos dos sistemas de distribuição das concessionárias do país, que devem extrair o máximo de informações possível da topologia da rede e de poucos dados de medições nos alimentadores, utiliza-se, para desenvolver tal técnica neste trabalho, um método de fluxo de potência trifásico do tipo varredura *backward/forward sweep* e soma de correntes [24]. Os métodos de varredura são fáceis de serem implementados computacionalmente e, em geral, alcançam a convergência com baixo tempo de processamento. A seguir, são apresentados o modelo matemático e o algoritmo do fluxo de potência tipo varredura utilizado.

2.1.1 Fluxo de potência para redes trifásicas

Uma característica especial dos métodos de fluxo de potência de varredura é que os ramos (seções da rede) devem ser ordenados em camadas, sendo a primeira delas originada no nó raiz do alimentador. Assim, em cada camada, a numeração dos nós iniciais dos ramos sempre será menor do que aquela dos nós finais dos ramos, e os ramos da camada superior têm uma numeração menor que aqueles da camada inferior. Essa característica é utilizada pelo algoritmo durante os passos *backward* e *forward* do processo de varredura. Na figura 2.1, ilustra-se a disposição em camadas de um alimentador de distribuição.

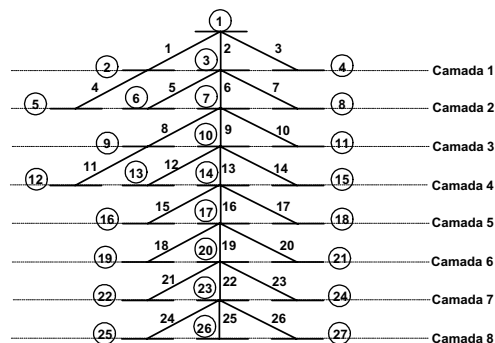


Figura 2.1 – Esquema de numeração dos nós e ramos de uma rede de distribuição disposta em camadas.

No algoritmo de fluxo de potência trifásico, cada nó ou seção de linha da rede é numerado com um único índice, independentemente do número de fases presentes nesse nó ou nessa seção de linha. A impedância série de uma dada seção de linha, l , é definida pela matriz:

$$Z_l = \begin{bmatrix} Z_{aa,l} & Z_{ab,l} & Z_{ac,l} \\ Z_{ab,l} & Z_{bb,l} & Z_{bc,l} \\ Z_{ac,l} & Z_{bc,l} & Z_{cc,l} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Na equação (2.1), os elementos da diagonal principal são as impedâncias próprias das fases, e os elementos fora da diagonal são as impedâncias mútuas entre as fases. Para seções de linha que apresentam características bifásicas ou monofásicas, devem-se zerar os valores correspondentes à fase que não está presente na configuração da rede. Na figura 2.2, ilustra-se a representação de uma seção de linha, l , entre os nós j e k com as admitâncias *shunt* e cargas conectadas em cada um dos nós.

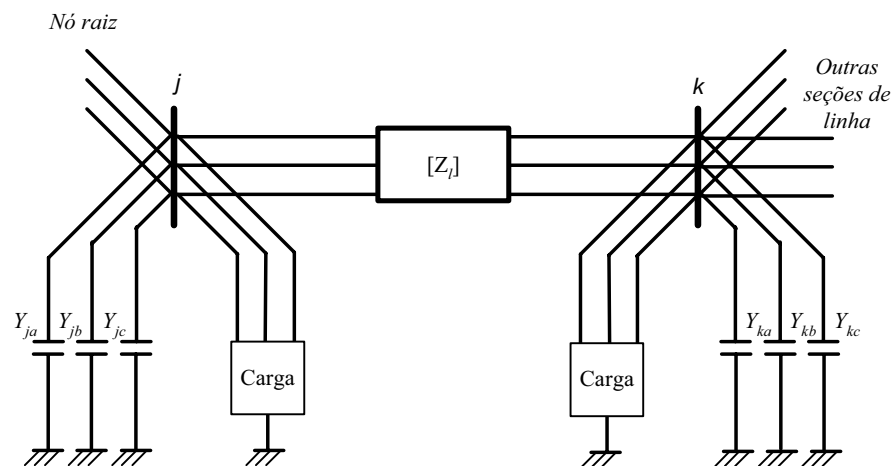


Figura 2.2 – Representação de uma seção de linha trifásica.

O nó raiz é considerado como sendo o nó de referência, em que as magnitudes e os ângulos das tensões das fases são conhecidos. Para iniciar o algoritmo de fluxo de potência (*flat start*), consideram-se, ainda, as tensões iniciais para todos os nós do alimentador iguais às tensões do nó de referência [24]. O processo iterativo do algoritmo de fluxo de potência para alimentadores radiais consiste, basicamente, nos seguintes passos, sendo para a n -ésima iteração:

- i) Cálculo das correntes dos nós:

$$\begin{bmatrix} I_{ja} \\ I_{jb} \\ I_{jc} \end{bmatrix}^{(n)} = \begin{bmatrix} (S_{ja}/V_{ja}^{(n-1)})^* \\ (S_{jb}/V_{jb}^{(n-1)})^* \\ (S_{jc}/V_{jc}^{(n-1)})^* \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Y_{ja} & 0 & 0 \\ 0 & Y_{jb} & 0 \\ 0 & 0 & Y_{jc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{ja} \\ V_{jb} \\ V_{jc} \end{bmatrix}^{(n-1)} \quad (2.2)$$

sendo:

I_{ja}, I_{jb}, I_{jc} : injeções de correntes correspondentes às cargas de potência constante e aos elementos *shunt* conectados no nó j ;

S_{ja}, S_{jb}, S_{jc} : cargas conectadas ao nó j ;

V_{ja}, V_{jb}, V_{jc} : tensões no nó j ;

Y_{ja}, Y_{jb}, Y_{jc} : admitâncias de todos os elementos *shunt* conectados ao nó j .

ii) Executar um passo *backward* para calcular as correntes nos ramos: Iniciando-se na seção de linha da última camada e movendo-se em direção ao nó raiz, a corrente na seção de linha l é dada por:

$$\begin{bmatrix} J_{la} \\ J_{lb} \\ J_{lc} \end{bmatrix}^{(n)} = - \begin{bmatrix} I_{ka} \\ I_{kb} \\ I_{kc} \end{bmatrix}^{(n)} + \sum_{m \in M} \begin{bmatrix} J_{ma} \\ J_{mb} \\ J_{mc} \end{bmatrix}^{(n)} \quad (2.3)$$

sendo:

J_{la}, J_{lb}, J_{lc} : correntes fluindo na seção de linha l ;

M : conjunto de seções de linhas conectadas ao nó k .

Na equação (2.3), o sinal negativo é introduzido para manter a consistência com as injeções de correntes calculadas na equação (2.2).

iii) Executar um passo *forward* para atualizar as tensões nodais: Iniciando-se na primeira camada e movendo-se em direção à última camada, as tensões no nó k são dadas por:

$$\begin{bmatrix} V_{ka} \\ V_{kb} \\ V_{kc} \end{bmatrix}^{(n)} = \begin{bmatrix} V_{ja} \\ V_{jb} \\ V_{jc} \end{bmatrix}^{(n)} - \begin{bmatrix} Z_{aa,l} & Z_{ab,l} & Z_{ac,l} \\ Z_{ab,l} & Z_{bb,l} & Z_{bc,l} \\ Z_{ac,l} & Z_{bc,l} & Z_{cc,l} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} J_{la} \\ J_{lb} \\ J_{lc} \end{bmatrix}^{(n)} \quad (2.4)$$

Uma vez que os três passos descritos acima foram executados dentro de uma mesma iteração, os desvios de potência são calculados para todas as fases de cada um dos nós, de acordo com a equação (2.5):

$$\begin{aligned}
\Delta S_{ja}^{(n)} &= V_{ja}^{(n)} \cdot \left(I_{ja}^{(n)} \right)^* - Y_{ja} \cdot \left| V_{ja}^{(n)} \right|^2 - S_{ja} \\
\Delta S_{jb}^{(n)} &= V_{jb}^{(n)} \cdot \left(I_{jb}^{(n)} \right)^* - Y_{jb} \cdot \left| V_{jb}^{(n)} \right|^2 - S_{jb} \\
\Delta S_{jc}^{(n)} &= V_{jc}^{(n)} \cdot \left(I_{jc}^{(n)} \right)^* - Y_{jc} \cdot \left| V_{jc}^{(n)} \right|^2 - S_{jc}
\end{aligned} \tag{2.5}$$

Os passos *i*, *ii* e *iii* são repetidos até que as partes real e imaginária dos desvios de potências se encontrem dentro de uma tolerância de convergência especificada.

As equações (2.2) e (2.5) são válidas para cargas do tipo de potência constante. Porém as cargas presentes em um alimentador de distribuição apresentam características combinadas dos tipos de potência constante, impedância constante e corrente constante. Durante a análise de faltas, devido à grande variação das tensões e à presença de uma alta corrente fluindo pela rede de distribuição, é importante considerar esses três modelos na modelagem das cargas conectadas no alimentador. A seguir, são detalhados os modelos de cargas do tipo potência constante, impedância constante e corrente constante, bem como um modelo que combina os três e o correto uso dos mesmos no algoritmo de fluxo de potência.

2.2 Modelos das cargas

Geralmente, as cargas presentes em um sistema de distribuição de energia elétrica são especificadas pela potência complexa demandada por elas. Desta forma, pode-se especificar uma determinada carga conhecendo-se sua potência aparente (kVA) e seu fator de potência ($\cos\phi$), sua potência ativa (kW) e seu fator de potência ou sua potência ativa e sua potência reativa (kVAr).

As cargas conectadas em sistemas de distribuição de energia elétrica podem ser trifásicas, bifásicas ou monofásicas. As cargas trifásicas podem ser conectadas em estrela ou delta. Em [26] apresenta-se uma modelagem genérica de cargas para ser empregada na localização de faltas em alimentadores de distribuição de energia elétrica. Nessa modelagem, por meio de testes executados, foram definidos alguns parâmetros que podem simular cargas dos mais variados tipos. São definidas, porém, faixas de valores para os parâmetros, o que ainda pode dificultar a escolha dos valores numéricos para a representação das cargas, que são de natureza probabilística. Diante disso, neste trabalho é proposta uma modelagem não genérica, mas definida para cada tipo de carga (potência, corrente e impedância constante), e, quando da necessidade da representação de um modelo de carga mista, uma combinação dos três modelos anteriormente definidos pode ser utilizada, uma vez que, com base no conhecimento das características dos consumidores, pode ser mais fácil estipular a

porcentagem de cada tipo de carga conectada em cada transformador de distribuição. Na figura 2.3, apresenta-se a representação de uma carga conectada em estrela ou em delta.

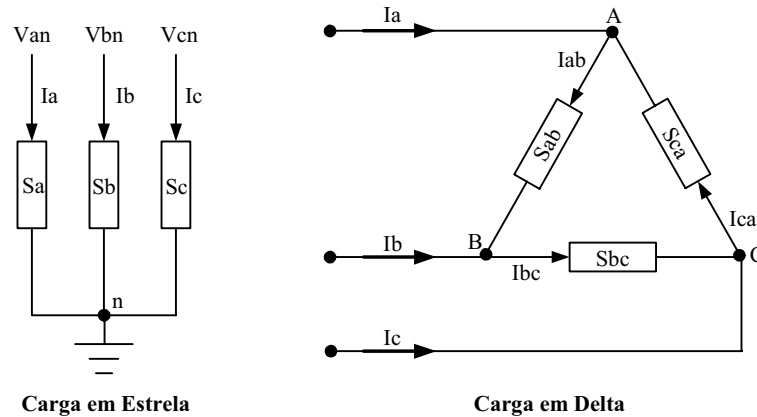


Figura 2.3 – Representação de uma carga conectada em estrela ou em delta.

As equações básicas envolvidas na definição do modelo de carga são apresentadas a seguir.

$$S_{esp} = V_{esp} \cdot I_{esp}^* \quad (2.6)$$

$$V_{esp} = Z_{esp} \cdot I_{esp} \quad (2.7)$$

Na equação (2.6), define-se a potência em função do fasor da tensão e do fasor conjugado da corrente na carga, e, na equação (2.7), define-se o fasor da tensão em função dos fasores da impedância e da corrente da carga.

2.2.1 Modelo de carga de potência constante

Neste tipo de carga, mesmo havendo variação da tensão aplicada em seus terminais, a potência da carga é sempre constante. Na equação (2.8), define-se a potência de uma carga, para uma dada condição, em que tal carga está conectada com tensão diferente da tensão nominal.

$$S = V \cdot I^* \quad (2.8)$$

Considerando que a carga não apresenta variação nem no módulo de sua potência nem em seu fator de potência, isto é, $S = S_{esp}$, igualando-se (2.6) e (2.8), tem-se:

$$V_{esp} \cdot I_{esp}^* = V \cdot I^* \quad (2.9)$$

Como no algoritmo do fluxo de potência utilizam-se as injeções de correntes das cargas, o conjugado da corrente na carga para a nova condição é dado por:

$$I^* = \frac{V_{esp} \cdot I_{esp}^*}{V} \quad (2.10)$$

Substituindo-se (2.6) em (2.10) e fazendo-se as devidas considerações, tem-se:

$$I = \left(\frac{S_{esp}}{V} \right)^* \quad (2.11)$$

A equação (2.11) define a corrente de uma carga de potência constante quando essa carga está conectada com tensão diferente de sua tensão nominal ou especificada.

2.2.2 Modelo de carga de impedância constante

Neste tipo de carga, mesmo havendo variação da tensão aplicada em seus terminais, a impedância da carga é sempre constante. Combinando-se as equações (2.6) e (2.7), pode-se definir a impedância especificada de uma carga, em função da tensão e da potência especificadas, como:

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

Considerando a equação (2.7) para a condição em que a carga está conectada com tensão diferente da tensão nominal, a nova corrente dessa carga é dada por:

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

Considerando que a carga não apresenta variação de sua impedância, isto é, $Z = Z_{esp}$, substitui-se (2.12) em (2.13) e tem-se:

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

A equação (2.14) define a corrente de uma carga de impedância constante quando essa carga está conectada com tensão diferente de sua tensão nominal ou especificada.

2.2.3 Modelo de carga de corrente constante

Neste tipo de carga, mesmo havendo variação da tensão aplicada em seus terminais, a magnitude da corrente da carga é sempre constante. A equação (2.6) fornece a potência de uma carga em condições nominais, e a equação (2.8) fornece a potência de uma carga em condições diferentes das nominais. Por meio dessas duas equações, pode-se definir a corrente

da carga para condições nominais e para uma outra condição não nominal, como dado pelas equações (2.15) e (2.16).

$$I_{esp} = \left(\frac{S_{esp}}{V_{esp}} \right)^* \Rightarrow |I_{esp}| \cdot e^{j\gamma_{esp}} = \left| \frac{S_{esp}}{V_{esp}} \right| \cdot e^{j(\theta_{esp} - \varphi_{esp})} \quad (2.15)$$

$$I = \left(\frac{S}{V} \right)^* \Rightarrow |I| \cdot e^{j\gamma} = \left| \frac{S}{V} \right| \cdot e^{j(\theta - \varphi)} \quad (2.16)$$

Considerando que a magnitude da corrente da carga é sempre constante e que o fator de potência da carga também é sempre constante, isto é, $|I| = |I_{esp}|$ e $\cos\varphi = \cos\varphi_{esp}$, de (2.15) e (2.16), tem-se:

$$|I| \cdot e^{j\gamma} = \left| \frac{S}{V} \right| \cdot e^{j(\theta - \varphi_{esp})} \quad (2.17)$$

$$|S| = \frac{|S_{esp}| \cdot |V|}{|V_{esp}|} \quad (2.18)$$

Substituindo-se (2.18) em (2.17), tem-se:

$$|I| \cdot e^{j\gamma} = \left| \frac{S_{esp}}{V_{esp}} \right| \cdot e^{j(\theta - \varphi_{esp})} \quad (2.19)$$

Em termos da nova tensão aplicada nos terminais da carga, a equação (2.19) pode ser reescrita como:

$$I = \frac{S_{esp}^*}{|V_{esp}|} \cdot \frac{V}{|V|} \quad (2.20)$$

Na equação (2.20), define-se a corrente de uma carga de corrente constante quando essa carga está conectada com tensão diferente de sua tensão nominal ou especificada.

2.2.4 Modelo combinado de carga

A representação do modelo de carga mista é uma combinação dos modelos de carga de potência constante, corrente constante e impedância constante. Assim, o modelo combinado de carga é definido como sendo uma combinação linear das equações (2.11), (2.14) e (2.20), dada por:

$$I = \frac{\alpha}{100} \cdot \left(\frac{S_{esp}}{V} \right)^* + \frac{\beta}{100} \cdot \left(\frac{V \cdot S_{esp}^*}{|V_{esp}|^2} \right) + \frac{\delta}{100} \cdot \left(\frac{S_{esp}^*}{|V_{esp}|} \cdot \frac{V}{|V|} \right) \quad (2.21)$$

sendo:

- α : porcentagem de carga de potência constante;
- β : porcentagem de carga de impedância constante;
- δ : porcentagem de carga de corrente constante, e;
- $\alpha + \beta + \delta = 100,0$.

2.3 Redefinição dos modelos para cargas em estrela ou delta

É necessário identificar corretamente as grandezas a serem utilizadas nas equações definidas para os modelos de cargas quando estas estão conectadas em estrela ou em delta. A seguir são definidas essas grandezas.

2.3.1 Cargas conectadas em estrela

As equações (2.11), (2.14), (2.20) e (2.21) foram definidas com base nas grandezas V_{esp} , S_{esp} e V . Considerando a notação para a fase A, na figura 2.3, e a carga conectada em estrela, tem-se que:

$$S_{esp} = S_a;$$

$$V_{esp} = V_{an}, \text{ para a condição nominal, e;}$$

$$V = V_{an}, \text{ para a condição diferente da nominal.}$$

De forma análoga, definem-se as grandezas para cargas conectadas nas fases B e C.

2.3.2 Cargas conectadas em delta

As equações (2.11), (2.14), (2.20) e (2.21) foram definidas com base nas grandezas V_{esp} , S_{esp} e V . Considerando a notação para a carga conectada entre as fases A e B, na figura 2.3, e a carga conectada em delta, tem-se que:

$$S_{esp} = S_{ab};$$

$$V_{esp} = V_{ab}, \text{ para a condição nominal, e;}$$

$$V = V_{ab}, \text{ para a condição diferente da nominal.}$$

De forma análoga, definem-se as grandezas para cargas conectadas entre as fases B e C e as fases C e A.

2.4 Alterações nas equações do fluxo de potência para considerar cargas de impedância constante, de corrente constante e mistas

O equacionamento utilizado pelo algoritmo de fluxo de potência apresentado na subseção 2.1.1 foi desenvolvido considerando o modelo de carga de potência constante. Como apresentado anteriormente, todavia, é comum que nos alimentadores de distribuição estejam conectadas cargas com características de corrente constante ou impedância constante. Na maioria das vezes, devido à grande dificuldade de identificar as características do conjunto de todas as cargas conectadas a um transformador de distribuição, é viável o emprego de um modelo combinado para as cargas, como discutido na subseção 2.2.4. Desta forma, deve-se dedicar atenção especial às equações (2.2) e (2.5), para que o algoritmo de fluxo de potência possa convergir e apresentar resultados coerentes e confiáveis.

A equação (2.2) fornece as injeções de correntes correspondentes às cargas de potência constante e aos elementos *shunt* conectados em um dado nó j . A equação (2.21) fornece as injeções de correntes correspondentes a um modelo combinado de cargas. Assim, substitui-se a equação (2.21) na equação (2.2) e tem-se:

$$\begin{bmatrix} I_{ja} \\ I_{jb} \\ I_{jc} \end{bmatrix}^{(n)} = \begin{bmatrix} \frac{\alpha}{100} \cdot \left(\frac{S_{ja}^{esp}}{V_{ja}^{(n-1)}} \right)^* + \frac{\beta}{100} \cdot \left(\frac{V_{ja}^{(n-1)} \cdot S_{ja}^{esp}}{|V_{esp}|^2} \right) + \frac{\delta}{100} \cdot \left(\frac{(S_{ja}^{esp})^* \cdot (V_{ja}^{(n-1)})}{|V_{esp}| \cdot |V_{ja}^{(n-1)}|} \right) \\ \frac{\alpha}{100} \cdot \left(\frac{S_{jb}^{esp}}{V_{jb}^{(n-1)}} \right)^* + \frac{\beta}{100} \cdot \left(\frac{V_{jb}^{(n-1)} \cdot S_{jb}^{esp}}{|V_{esp}|^2} \right) + \frac{\delta}{100} \cdot \left(\frac{(S_{jb}^{esp})^* \cdot (V_{jb}^{(n-1)})}{|V_{esp}| \cdot |V_{jb}^{(n-1)}|} \right) \\ \frac{\alpha}{100} \cdot \left(\frac{S_{jc}^{esp}}{V_{jc}^{(n-1)}} \right)^* + \frac{\beta}{100} \cdot \left(\frac{V_{jc}^{(n-1)} \cdot S_{jc}^{esp}}{|V_{esp}|^2} \right) + \frac{\delta}{100} \cdot \left(\frac{(S_{jc}^{esp})^* \cdot (V_{jc}^{(n-1)})}{|V_{esp}| \cdot |V_{jc}^{(n-1)}|} \right) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Y_{ja} & 0 & 0 \\ 0 & Y_{jb} & 0 \\ 0 & 0 & Y_{jc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{ja} \\ V_{jb} \\ V_{jc} \end{bmatrix}^{(n-1)} \quad (2.22)$$

A utilização da equação (2.22) no algoritmo de fluxo de potência requer que a equação (2.5) também seja reescrita para considerar o modelo combinado de carga. Caso contrário, os desvios de potências não serão calculados de forma correta e, conseqüentemente, a convergência pode não ser alcançada; mesmo que o algoritmo convirja, os resultados apresentados estarão corrompidos por erros. A alteração que deve ser feita na equação (2.5) diz respeito à potência especificada. Essa potência deve ser corrigida levando em consideração as características do novo modelo de carga empregado. Substituindo-se a equação (2.14) na equação (2.8), tem-se:

$$S = S_{esp} \cdot \left(\frac{|V|}{|V_{esp}|} \right)^2 \quad (2.23)$$

Substituindo-se a equação (2.20) na equação (2.8), tem-se:

$$S = S_{esp} \cdot \left(\frac{|V|}{|V_{esp}|} \right)^1 \quad (2.24)$$

Substituindo-se a equação (2.11) na equação (2.8), tem-se:

$$S = S_{esp} \quad (2.25)$$

As equações (2.23) e (2.24) fornecem a nova potência da carga em função da potência especificada, da tensão especificada (nominal) e da nova tensão aplicada aos terminais da carga. A equação (2.25) define que a nova potência é igual à potência especificada. Em termos da tensão especificada e da nova tensão aplicada aos terminais da carga, a equação (2.25) pode ser reescrita como:

$$S = S_{esp} \cdot \left(\frac{|V|}{|V_{esp}|} \right)^0 \quad (2.26)$$

Substituindo-se a equação (2.21) na equação (2.8), tem-se:

$$S = \frac{\alpha}{100} \cdot S_{esp} \cdot \left(\frac{|V|}{|V_{esp}|} \right)^0 + \frac{\delta}{100} \cdot S_{esp} \cdot \left(\frac{|V|}{|V_{esp}|} \right)^1 + \frac{\beta}{100} \cdot S_{esp} \cdot \left(\frac{|V|}{|V_{esp}|} \right)^2 \quad (2.27)$$

A equação (2.5) pode ser reescrita para um modelo combinado de carga substituindo-se a equação (2.27) na equação (2.5). Obtém-se, assim:

$$\begin{aligned} \Delta S_{ja}^{(n)} &= V_{ja}^{(n)} \cdot (I_{ja}^{(n)})^* - Y_{ja} \cdot |V_{ja}^{(n)}|^2 - \left(\frac{\alpha}{100} \cdot S_{ja}^{esp} \cdot \left(\frac{|V_{ja}^{(n)}|}{|V_{esp}|} \right)^0 + \frac{\delta}{100} \cdot S_{ja}^{esp} \cdot \left(\frac{|V_{ja}^{(n)}|}{|V_{esp}|} \right)^1 + \frac{\beta}{100} \cdot S_{ja}^{esp} \cdot \left(\frac{|V_{ja}^{(n)}|}{|V_{esp}|} \right)^2 \right) \\ \Delta S_{jb}^{(n)} &= V_{jb}^{(n)} \cdot (I_{jb}^{(n)})^* - Y_{jb} \cdot |V_{jb}^{(n)}|^2 - \left(\frac{\alpha}{100} \cdot S_{jb}^{esp} \cdot \left(\frac{|V_{jb}^{(n)}|}{|V_{esp}|} \right)^0 + \frac{\delta}{100} \cdot S_{jb}^{esp} \cdot \left(\frac{|V_{jb}^{(n)}|}{|V_{esp}|} \right)^1 + \frac{\beta}{100} \cdot S_{jb}^{esp} \cdot \left(\frac{|V_{jb}^{(n)}|}{|V_{esp}|} \right)^2 \right) \\ \Delta S_{jc}^{(n)} &= V_{jc}^{(n)} \cdot (I_{jc}^{(n)})^* - Y_{jc} \cdot |V_{jc}^{(n)}|^2 - \left(\frac{\alpha}{100} \cdot S_{jc}^{esp} \cdot \left(\frac{|V_{jc}^{(n)}|}{|V_{esp}|} \right)^0 + \frac{\delta}{100} \cdot S_{jc}^{esp} \cdot \left(\frac{|V_{jc}^{(n)}|}{|V_{esp}|} \right)^1 + \frac{\beta}{100} \cdot S_{jc}^{esp} \cdot \left(\frac{|V_{jc}^{(n)}|}{|V_{esp}|} \right)^2 \right) \end{aligned} \quad (2.28)$$

3 Técnica proposta para localização de faltas em alimentadores de distribuição de energia elétrica

Técnicas para localização *on-line* de faltas em redes de distribuição são ferramentas importantes para preservar a confiabilidade da operação do sistema e a redução de custos de operação e manutenção, principalmente para faltas recorrentes. Em se tratando de faltas permanentes, muitas vezes, o trabalho das equipes de manutenção para encontrar o local da falta pode ser aliviado com o auxílio de chamadas telefônicas recebidas no centro de atendimento ao cliente. Entretanto, para faltas temporárias, porém recorrentes, torna-se difícil obter o local ou a região da falta para a realização de manutenção preventiva. Desse modo, um algoritmo para localização de faltas se faz necessário.

Devido às características dos alimentadores de distribuição, tais como não homogeneidade dos condutores da rede, grande número de ramais laterais e alta diversidade das cargas, entre outras, o problema de localização de faltas em alimentadores de distribuição é distinto do mesmo problema para a transmissão de energia elétrica, e sua solução pode ser mais complexa. Na literatura, encontram-se técnicas para localização de faltas em alimentadores de distribuição de energia elétrica que utilizam fasores de frequência fundamental e análise de circuitos elétricos [1], [4], [5], [7], [9] – [23]. As técnicas e

algoritmos empregados em cada uma dessas propostas dependem dos dados disponíveis e do nível de automação das redes e das subestações de distribuição. Desta forma, de acordo com a política de investimentos das empresas em sistemas de automação e controle, devem ser desenvolvidos técnicas e algoritmos de localização de faltas que são função da quantidade e qualidade das informações disponíveis tanto da topologia como do estado operacional da rede pré e pós falta.

O grau de sofisticação dos algoritmos e a precisão dos resultados obtidos para esses sistemas é função também da qualidade da base de dados utilizada. Um conjunto de técnicas para localização de faltas publicado na literatura é baseado em algoritmos que utilizam os fasores tensão e corrente medidos no nó inicial do alimentador, bem como em técnicas de varredura de circuitos que, partindo do nó inicial, analisam todas as seções do alimentador para identificar a provável seção em falta. Uma vez encontrada esta seção, o ponto em falta dentro da mesma é obtido de forma iterativa, de modo que a cada iteração as correntes das cargas e a corrente de falta estimada são atualizadas até a convergência ser encontrada [17], [19] e [20]. De acordo com os autores desses trabalhos, tais técnicas apresentam resultados com precisão adequada, porém, em alguns casos, faz-se necessário utilizar análises adicionais para identificar a correta seção em falta, como, por exemplo, carga rejeitada após a eliminação de uma falta e de cenários de formas de ondas.

Considerando que um algoritmo para localização de faltas em alimentadores de distribuição deve ser computacionalmente rápido e fornecer resultados confiáveis, o algoritmo proposto neste trabalho foi desenvolvido com base no método de fluxo de potência *backward/forward sweep* apresentado no Capítulo 2, em conjunto com o uso de medições esparsas de tensão ao longo do alimentador. Desta forma, obteve-se um algoritmo que demanda baixo esforço computacional e fornece resultados confiáveis, indicando, com precisão adequada, o verdadeiro local da falta ou a área de incidência da falta. Neste capítulo, são descritas as principais características do algoritmo proposto para localização de faltas em alimentadores de distribuição de energia elétrica, utilizando medições esparsas de tensão.

3.1 Medições no nó inicial do alimentador

Os fasores pré-falta, durante a falta e pós-falta das tensões e correntes são obtidos através dos dados oscilográficos provenientes dos dispositivos eletrônicos inteligentes (IED's) instalados no nó inicial de cada alimentador, como ilustrado na figura 3.1. O algoritmo

proposto utiliza como dados de entrada os fasores de frequência fundamental, de pré e durante a falta, que podem ser extraídos das amostras de sinais registrados por esses equipamentos. Importa ressaltar que as técnicas de aquisição e tratamento desses dados não são objetos de estudo deste trabalho de pesquisa.

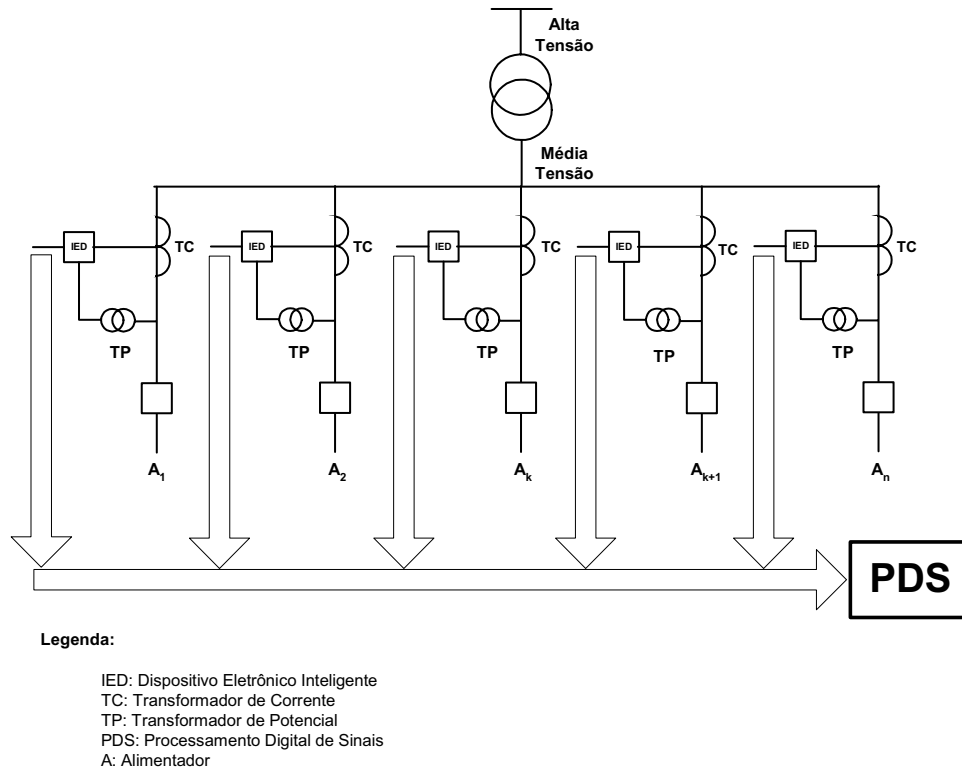


Figura 3.1 - IED's instalados nos alimentadores.

3.2 Medições esparsas de tensões ao longo do alimentador

A magnitude das tensões durante a falta são medidas em alguns nós do alimentador usando dispositivos dedicados somente para propósitos de localização de faltas ou usando medidores de qualidade de energia já instalados no alimentador, desde que os dados necessários sejam disponibilizados por esses medidores. As magnitudes das tensões podem ser calculadas através do uso da Transformada Discreta de Fourier ou utilizando-se a equação (3.1) que fornece o valor *RMS* da tensão para uma janela de dados de um ciclo.

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} v_i^2} \quad (3.1)$$

sendo:

v_i : valor instantâneo da tensão;

n : número de amostras em uma janela de dados de um ciclo.

3.3 Potência complexa no nó inicial do alimentador

Os fasores pré-falta da corrente e da tensão medidos no nó inicial da subestação são usados para calcular a potência pré-falta injetada no nó inicial do alimentador, na subestação. Essa potência contém as perdas ao longo do alimentador. Quando possível, portanto, tais perdas devem ser eliminadas do total da potência calculada. Sabe-se também que, para as mesmas condições iniciais, o fluxo de potência converge com valores diferentes para a potência injetada no nó inicial, para o mesmo carregamento inicial e diferentes modelos de cargas utilizados. Por exemplo, pode-se considerar que todos os transformadores estejam com carregamento nominal e que seja adotado o modelo de carga de potência constante. Após a convergência do fluxo de potência, a potência total injetada no nó inicial é maior do que o somatório da potência nominal de todos os transformadores instalados no alimentador. A diferença entre essas potências são as perdas.

Já para a mesma condição de carregamento, mas considerando as cargas modeladas como impedâncias constantes, após a convergência, a potência total injetada no nó inicial do alimentador é diferente, geralmente menor do que o somatório da potência nominal dos transformadores. Esse efeito se verifica porque as cargas do tipo de impedância e corrente constantes têm o valor de sua potência alterado de acordo com a tensão aplicada em seus terminais.

3.4 Estimativa da potência pré-falta dos transformadores de distribuição

A dificuldade para se estimar o carregamento exato dos transformadores de distribuição durante a falta é uma das fontes de erros dos algoritmos de localização de faltas. Neste trabalho, a estimativa do carregamento de cada transformador de distribuição é feita de forma semelhante à apresentada em [20]. O carregamento é estimado com base na potência nominal de cada transformador, a qual está armazenada em uma base de dados, na potência pré-falta estimada para a subestação e, caso esteja disponível, o carregamento médio mensal dos transformadores também pode ser utilizado. Assim, a potência complexa pré-falta de cada transformador pode ser calculada de acordo com a equação:

$$S_i = \left(\beta_i S_i^{Nom} \cdot \frac{S_{SE}}{\sum_{k=1}^{nl} \beta_k S_k^{Nom}} \right) \cdot [\cos(\varphi_{SE}) + j \sin(\varphi_{SE})] \quad (3.2)$$

sendo:

S_i^{Nom} : Potência aparente do transformador;

S_{SE} : Potência aparente estimada para a subestação;

$\cos(\varphi_{SE})$: Fator de potência estimado para a subestação;

nl : Número total de transformadores instalados no alimentador;

β_i : Carregamento médio do transformador i , $0 \leq \beta_i \leq 1,0$.

Com base no que foi apresentado na subseção 3.3 e na equação (3.2), o algoritmo para estimar o carregamento dos transformadores compreende os seguintes passos:

- i.* Calcular a potência injetada no nó inicial do alimentador usando os valores da corrente e a tensão pré-falta medidas neste ponto;
- ii.* Calcular o somatório da potência nominal dos transformadores instalados no alimentador, utilizando os dados da base de dados;
- iii.* Estimar a potência inicial de cada transformador de distribuição a partir da equação (3.2);
- iv.* Definir o modelo de carga de cada transformador de distribuição;
- v.* Executar o fluxo de potência e comparar se as tensões e correntes após a convergência são iguais às medidas;
- vi.* Se as tensões e correntes calculadas forem iguais às medidas terminar. Em caso contrário, ir para o passo *vii*;
- vii.* Por meio da potência calculada no passo *i*, das tensões e correntes calculadas no passo *v*, calcular a nova potência para o nó inicial;
- viii.* Recalcular a nova potência dos transformadores e retornar ao passo *v* até que a convergência seja obtida.

Na figura 3.2, ilustram-se na forma de diagrama de blocos os passos descritos neste algoritmo para obter a estimativa do carregamento dos transformadores.

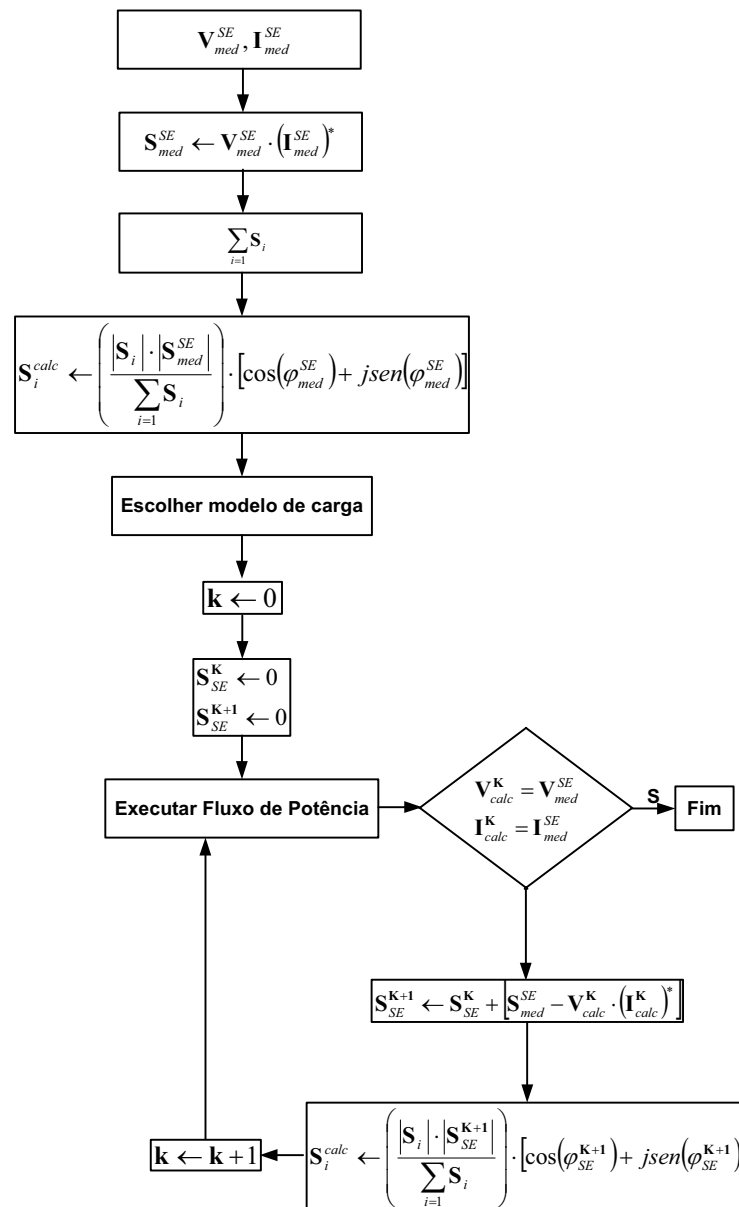


Figura 3.2 – Diagrama de blocos do algoritmo para cálculo da potência dos transformadores.

3.5 Cálculo dos desvios entre as tensões medidas e simuladas durante a falta para os pontos de medição

As informações dos desvios entre as tensões durante a falta medidas e calculadas são propostas para indicar se um determinado nó do alimentador é ou não um possível local de ocorrência da falta. Desse modo, o desvio entre as tensões durante a falta medidas e simuladas é definido por:

$$\delta_i = V_{med}^i - V_{calc}^{i,j} \quad (3.3)$$

sendo:

V_{med}^i : Magnitude da tensão durante a falta medida no nó i ;

$V_{calc}^{i,j}$: Magnitude da tensão calculada, para a condição de falta, para o nó i considerando uma falta no nó j .

Em condições ideais, isto é, quando as simulações são executadas com as mesmas condições de ocorrência da falta, os δ_i têm valores nulos para o verdadeiro nó em falta. Em situações reais, no entanto, devido a vários fatores, como a variação do carregamento dos transformadores, as condições de simulações dificilmente serão as mesmas das condições de ocorrência da falta. Assim, para os pontos de medição, as tensões calculadas podem ser maiores, menores ou iguais às tensões medidas. Desta forma, os δ_i podem ser nulos, positivos ou negativos. A variação no carregamento dos transformadores, o modelo de carga adotado nas simulações ou, ainda, a combinação destes fazem com que a distribuição de corrente durante o processo de busca do local em falta não seja a mesma da condição de falta. Esse efeito pode fazer com que, para a falta em um mesmo nó, os δ_i tenham valores e sinais distintos.

Diante disso, somente os valores fornecidos pela equação (3.3) não são suficientes para definir os locais candidatos a serem o verdadeiro ponto em falta. Para condições ideais, os δ_i são nulos, pois as tensões medidas e calculadas são iguais. Considerando, nas simulações para a localização da falta, o mesmo modelo de carga adotado para a situação de ocorrência da falta e variando igualmente o carregamento dos transformadores, os δ_i 's para o nó em falta não serão nulos, mas terão valores muito próximos entre si. Com base nesse comportamento de variação dos δ_i , a escolha e a seleção do provável local de uma falta fase-terra são feitas utilizando a seguinte equação:

$$lf_j = \min_{j=1, \dots, nb} \{ \max_{i=1, \dots, nm} \{ \delta_i \} - \min_{i=1, \dots, nm} \{ \delta_i \} \} \quad (3.4)$$

sendo:

nm : Total de pontos de medição;

nb : Total de nós analisado no alimentador.

O nó que apresenta o menor lf , calculado pela equação (3.4), é escolhido como sendo o provável ponto em falta, para uma falta fase-terra.

Para faltas bifásicas, bifásicas à terra, trifásicas e trifásicas à terra, deve-se modificar a equação (3.4) para que a escolha e a seleção do provável local da falta sejam feitas de forma adequada. Isso se deve ao fato de que, para esses tipos de faltas, existe mais de uma fase envolvida na falta, o que fornece dois ou três valores de lf para cada nó analisado. Assim, a

equação (3.4) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$lf_j = \min \{ \max_{i=1, \dots, nm} [\max(\delta_i^k) - \min(\delta_i^k)] \} \quad (3.5)$$

$$j = 1, \dots, nb$$

sendo:

k : indica a fase, a , b ou c .

A escolha e a seleção do provável nó em falta são efetuadas com base na análise dos valores lf_i calculados pela equação (3.5), a qual garante que, considerando todas as fases envolvidas na falta, o nó escolhido como sendo aquele em falta sempre terá um lf menor que os demais analisados.

3.6 Algoritmo para localização de faltas

O algoritmo de localização de faltas é baseado no algoritmo de fluxo de potência trifásico apresentado na subseção 2.1.1. O processo de localização de faltas é realizado executando-se os passos de i a xv do algoritmo descrito a seguir.

- i.* Fazer a leitura das grandezas tensão e corrente para o nó inicial do alimentador, das tensões medidas nos nós ao longo do alimentador e da informação do tipo de falta ocorrido;
- ii.* Buscar os dados do alimentador na base de dados;
- iii.* Definir o modelo de carga a ser utilizado;
- iv.* Estimar o carregamento dos transformadores como mostrado na subseção 3.4;
- v.* Atribuir a todos os nós do alimentador a tensão medida no nó inicial;
- vi.* Calcular a corrente de falta;
- vii.* Injetar a corrente de falta no nó sob análise;
- viii.* Executar o algoritmo de fluxo de potência;
- ix.* Verificar se a injeção de corrente calculada para o nó inicial do alimentador é igual à medida durante a falta;
- x.* Voltar ao passo *vi*, se a resposta for negativa;
- xi.* Se for positiva, calcular os desvios entre as tensões medidas e simuladas para os pontos de medição;
- xii.* Voltar ao passo *v*, até que todos os nós de interesse sejam analisados;
- xiii.* Considerando a falta em cada um dos nós de interesse, calcular os lf 's, isto é, a diferença entre o maior e o menor desvio do passo *xi*. para os nós de medição;
- xiv.* Fazer a classificação dos prováveis nós em falta;

xv. Selecionar, como o local em falta, o nó que apresenta a menor diferença calculada no passo *xiii*.

Na figura 3.3, ilustra-se o diagrama de blocos deste algoritmo.

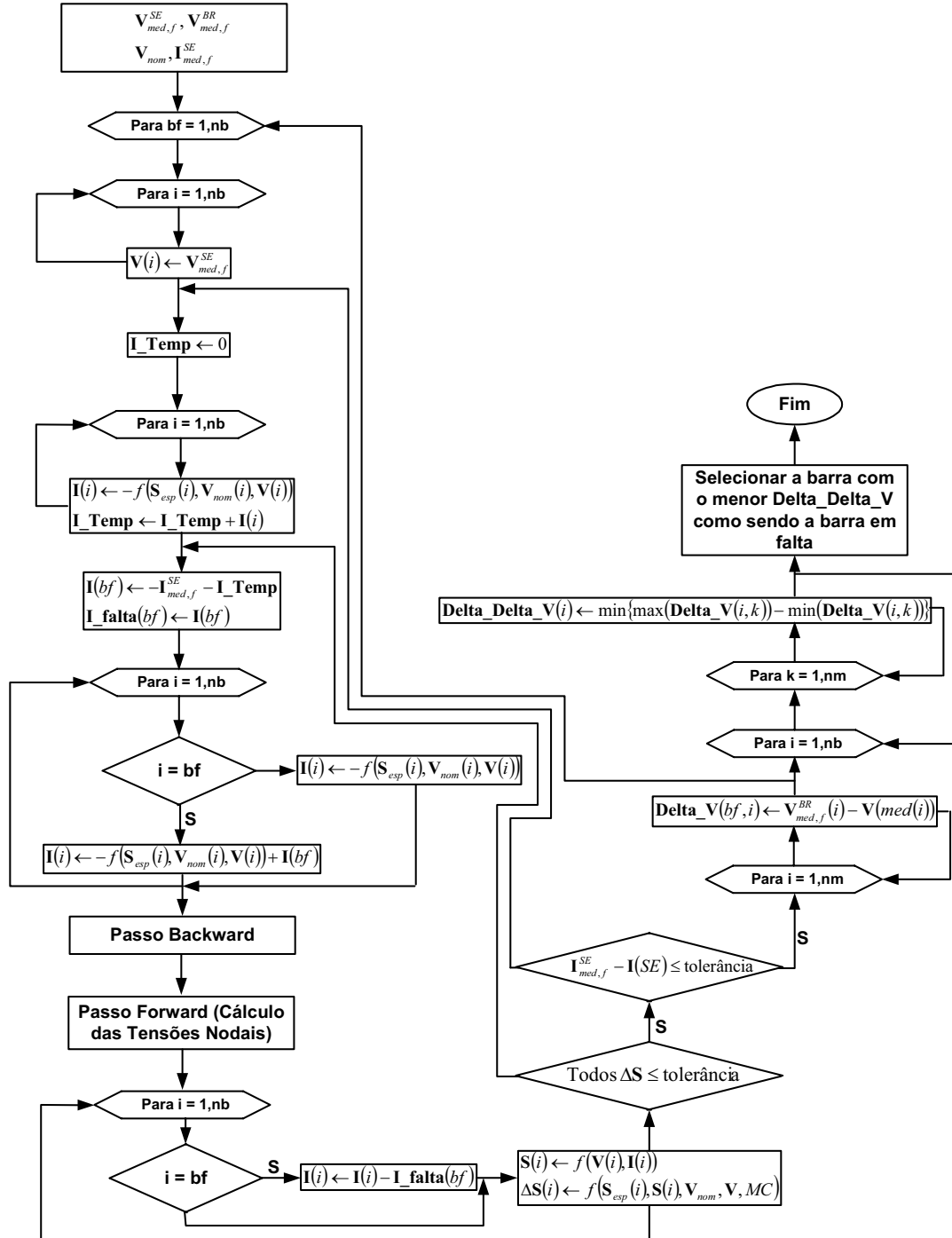


Figura 3.3 – Diagrama de blocos do algoritmo para localização de faltas.

4 Alocação Otimizada de Medidores de Tensão para Localização de Falhas em Alimentadores de Distribuição de Energia Elétrica

A localização de falhas em redes de distribuição de energia elétrica envolve a instrumentação utilizada para aquisição e tratamento de sinais elétricos de corrente e tensão no alimentador e algoritmos computacionais específicos que utilizam essas medições para determinar, com aceitável grau de precisão e segurança, o local ou região da falta no alimentador.

Neste contexto, deve-se buscar um equilíbrio entre os custos de aquisição de dispositivos a serem instalados no alimentador, os benefícios aos consumidores em termos de qualidade e confiabilidade do serviço de fornecimento de energia e os retornos financeiros proporcionados para as empresas distribuidoras. A alocação otimizada desses dispositivos no alimentador é um problema que está diretamente relacionado com a eficiência, a precisão e a confiabilidade dos algoritmos para localização de falhas. Alguns autores propõem, para localização de falhas, algoritmos que utilizam medições provenientes de diferentes quantidades de medidores instalados no alimentador. Na referência [21], é proposta uma técnica para localização de falhas utilizando medição de tensão, a qual utiliza medição

somente no nó inicial do alimentador na subestação. Essa proposta se torna de difícil aplicação quando o valor da resistência de falta é diferente de zero.

Na referência [22], é proposta uma técnica para localização de faltas que utiliza medições de correntes e tensões em todos os nós iniciais e finais de cada seção do alimentador. Essa seria a situação ideal para executar a localização de faltas; no entanto, de alto-custo, o que pode inviabilizar sua implementação.

Em [23], é apresentado um algoritmo para localização de fontes de distúrbios relacionados com qualidade de energia, incluindo faltas, que emprega uma quantidade menor de medidores de tensão e corrente quando comparado com o método proposto em [22]. Embora a quantidade de medidores empregada pelo algoritmo seja menor, sua implementação pode, ainda, ser proibitiva dependendo do porte do alimentador e dos recursos disponíveis para serem investidos na implantação de um método para localização de faltas.

Frente ao exposto, neste capítulo apresenta-se um modelo matemático de programação binária para alocação otimizada de medidores de tensão nos alimentadores de distribuição, com o propósito de melhorar a precisão da localização de faltas e manter a melhor relação custo benefício para as empresas de energia. Neste modelo, adota-se a técnica de localização de faltas utilizando medições de tensão, proposta no Capítulo 3, a qual utiliza abordagem trifásica da rede, de forma semelhante à apresentada em [7] para avaliar a função de adaptação. Essa abordagem trifásica permite tratar o problema da alocação de medidores de forma mais genérica e realista, bem como considerar as correntes de cargas de forma estocástica para cada fase do alimentador de distribuição.

Além disso, são apresentados a teoria básica envolvendo algoritmos genéticos e um algoritmo genético dedicado para solução do modelo matemático proposto para alocação de medidores de tensão em alimentadores aéreos de distribuição de energia elétrica.

4.1 Formulação Matemática do Problema de Alocação Otimizada de Medidores de Tensão

A alocação otimizada de medidores de tensão está relacionada diretamente com algoritmos computacionais que empregam medições de tensão ao longo do alimentador para executar a localização de faltas. Assim, um modelo matemático para alocação de tais equipamentos nos alimentadores de distribuição deve considerar, como uma ferramenta auxiliar para avaliar a função de adaptação, um algoritmo de localização de faltas. Este último busca definir a alocação de medidores de tensão visando estabelecer a melhor relação custo-

benefício entre os investimentos a serem feitos e os resultados obtidos pelo algoritmo de localização de faltas. Para reduzir os custos de implementação e operar com um bom nível de confiabilidade de dados e equipamentos no alimentador, deve-se utilizar uma quantidade reduzida de medidores de tensão instalados no alimentador, e esses medidores devem ser instalados em nós que melhoram os resultados finais da localização de faltas.

Na alocação otimizada de medidores de tensão para propósitos de localização de faltas, busca-se a minimização da distância entre o local de incidência da falta e o local encontrado pelo algoritmo de localização da mesma quando o algoritmo não encontra o verdadeiro local dessa falta com 100% de precisão, considerando a ocorrência de faltas em todos os nós do alimentador.

Como a técnica proposta não tem a habilidade de deslizar o ponto em falta sobre a rede, e sim analisar se a falta ocorreu nos pontos previamente definidos (nós), classes de precisão devem ser estipuladas para o erro na distância entre o local da falta e o ponto indicado pelo algoritmo de localização de faltas. Por exemplo, poderiam ser estipuladas as classes de precisão de 0 a 100 metros, de 100 a 200 metros e assim por diante. Desta forma, uma falta localizada com 100% de precisão faria parte da primeira classe citada anteriormente. Uma falta localizada como sendo em um nó distante 120 metros do nó em falta faria parte da segunda classe citada.

No modelo matemático apresentado para alocar os medidores de tensão no alimentador, consideram-se, portanto, essas classes de precisão e priorizam-se aquelas configurações que apresentam resultados com melhores classes de precisão. Tal modelo matemático é formulado como:

$$\begin{aligned}
 & \text{Min} \quad NM + a_1 \cdot 2^0 + a_2 \cdot 2^1 + a_3 \cdot 2^2 + \dots + a_{nc} \cdot 2^{nc-1} \\
 & \text{sujeito a :} \\
 & 2 \leq NM \leq NM_{\max} \\
 & \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n b_{1ij} = a_1, \quad \begin{cases} b_{ij} = 1, 0 \text{ se } lf_j \leq lf_i \text{ e } dpf_dpl \in \text{classe 1, } j \neq i \\ b_{ij} = 0, 0 \text{ se } lf_j > lf_i, & j \neq i \end{cases} \\
 & \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n b_{2ij} = a_2, \quad \begin{cases} b_{ij} = 1, 0 \text{ se } lf_j \leq lf_i \text{ e } dpf_dpl \in \text{classe 2, } j \neq i \\ b_{ij} = 0, 0 \text{ se } lf_j > lf_i, & j \neq i \end{cases} \\
 & \quad \cdot \\
 & \quad \cdot \\
 & \quad \cdot \\
 & \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n b_{ncij} = a_{nc}, \quad \begin{cases} b_{ij} = 1, 0 \text{ se } lf_j \leq lf_i \text{ e } dpf_dpl \in \text{classe nc, } j \neq i \\ b_{ij} = 0, 0 \text{ se } lf_j > lf_i, & j \neq i \end{cases}
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

sendo:

$$lf_i = \min \{ \max \{ \delta_k^i \} - \min \{ \delta_k^i \} \}, k = 1, \dots, NM$$

$$lf_j = \min \{ \max \{ \delta_k^j \} - \min \{ \delta_k^j \} \}, k = 1, \dots, NM$$

$$\delta_k^i = |V_{falta}^{k,i} - V_{calc}^{k,i}|, \quad \delta_k^j = |V_{falta}^{k,i} - V_{calc}^{k,j}|, k = 1, \dots, NM$$

NM : Número de medidores utilizados para a localização de faltas;

NM_max : Número máximo de medidores que podem ser instalados para propósitos de localização de faltas;

$V_{falta}^{k,i}$: Tensão durante a falta para o nó k para uma falta no nó i ;

$V_{calc}^{k,\alpha}$: Tensão durante a falta para o nó k , calculada durante o processo de localização da falta, para uma falta no nó α ;

d_{pf_dpl} : Distância entre o ponto em falta e o ponto localizado;

n : Número de nós do alimentador;

nc : Número de classes consideradas para o erro na distância entre o ponto em falta e o ponto encontrado pelo algoritmo de localização de faltas;

i : Nó em falta;

j : Nó considerado para a simulação da falta.

As definições apresentadas acima para os lf_i e lf_j são definidos para faltas fase-terra, conforme equação (3.4). Para outros tipos de faltas, essas variáveis devem ser definidas de acordo com a equação (3.5).

A equação (4.1) em conjunto com as equações envolvidas no cálculo do fluxo de potência representa um problema de programação não-linear binária e um algoritmo genético dedicado é proposto para encontrar a solução desse problema. A função objetivo visa reduzir o erro na distância entre o verdadeiro local da falta e a indicação dada pelo algoritmo de localização de faltas.

Deve-se observar que, apesar de o número de medidores estar presente na equação (4.1), este modelo não garante a minimização do número de medidores empregados porque os custos fixos devido à alocação de medidores não estão sendo considerados no modelo da função objetivo. Pode-se obter uma redução da quantidade desses dispositivos quando o número máximo especificado dos mesmos for muito elevado. Essa restrição de natureza econômica é contemplada através da especificação do número máximo de medidores que é permitido alocar no alimentador. Outros fatores, tais como locais onde não se podem instalar medidores e a consideração de falha de leitura e operação dos medidores, podem ser incorporados na função objetivo definida na equação (4.1), bem como por meio de restrições físicas, operacionais e econômicas.

4.2 Algoritmos Genéticos

O Algoritmo Genético (*AG*) trabalha com um conjunto de indivíduos (soluções codificadas) que constitui uma população. Cada uma dessas soluções é conhecida como cromossomo. Tal população é capaz de evoluir devido à aplicação dos operadores genéticos [27]: seleção, recombinação e mutação. Os indivíduos mais fortes sobrevivem durante o processo de otimização, o que propicia o surgimento de melhores configurações com indivíduos mais evoluídos e conduz a possíveis soluções ótimas para o problema. As características específicas de um indivíduo determinam sua capacidade de sobrevivência e, em última instância, essa capacidade específica é determinada pelo seu conteúdo genético, isto é, pela sua unidade elementar chamada *gene* na biologia.

A seleção natural leva à sobrevivência dos indivíduos mais bem dotados e, no processo de reprodução, esses indivíduos transmitem aos descendentes os melhores genes. Por outro lado, aqueles menos dotados morrem no processo de competição por espaço, alimento, etc. Assim, o princípio da seleção natural permite gerar descendentes somente dos indivíduos mais bem dotados. A evolução acontece, fundamentalmente, no processo de recombinação genética, que ocorre na duplicação e separação de células reprodutivas, gerando uma metade de célula (por exemplo, espermatozóide), e na reprodução, em que duas metades de células se juntam (espermatozóide e núcleo), formando o zigoto. Nesse processo, ocorre uma troca de material genético, que pode levar à geração de um indivíduo muito bem dotado. Nos Algoritmos Genéticos, todo o processo de otimização pode ser descrito como:

- Representação, em termos de cromossomo, das propostas de soluções (configurações) assumidas para o problema em estudo;
- Determinação de parâmetros de controle do algoritmo: tamanho da população, número de gerações, taxas relativas dos operadores genéticos, etc.;
- Geração da população inicial formada por indivíduos que representam um conjunto de possíveis soluções (configurações) do problema;
- Seleção das configurações candidatas a permanecerem na população: classificar cada configuração pelo valor de sua correspondente função de adaptação. Assim, os elementos mais bem classificados neste processo têm maior chance de participar da geração dos elementos da nova população, criada através da aplicação dos operadores de recombinação e mutação;

- Operadores genéticos (recombinação e mutação) que gerem, produzam e/ou alterem a composição dos cromossomos durante a reprodução.

O algoritmo genético é um caso particular de algoritmo evolutivo em que se utilizam números binários para representar os indivíduos da população. O algoritmo utilizado, neste trabalho, para fazer a alocação otimizada de medidores de tensão em alimentador de distribuição é um algoritmo genético dedicado.

A seguir, detalham-se os operadores e os parâmetros de controle do algoritmo genético clássico.

4.2.1 Seleção

O mecanismo de seleção indica a sobrevivência do ser mais adaptado, ou seja, as soluções mais bem adaptadas sobrevivem, e as mais fracas perecem. Para o problema de minimização, um indivíduo com valor de adaptação menor é considerado bem adaptado e, portanto, possui maiores chances de sobreviver podendo gerar um maior número de descendentes nas gerações subsequentes. Existem várias formas ou vários tipos de seleção, entre os quais se podem destacar:

- Seleção proporcional: cada configuração k tem direito de gerar um número de descendentes (nd_k), que é proporcional ao valor de sua função de adaptação (fa_k), de acordo com a relação:

$$nd_k = \frac{fa_k}{m\u00e9dia}; \quad m\u00e9dia = \frac{\sum_{i=1}^{tp} fa_i}{tp}; \quad tp: \text{n\u00famero de indiv\u00edduos da popula\u00e7\u00e3o (AG)}.$$

A express\u00e3o acima que define o nd_k n\u00e3o fornece n\u00fameros inteiros, o que n\u00e3o faz sentido, porque o n\u00famero de descendentes deve ser inteiro. Esse problema \u00e9 resolvido usando a roleta, na qual a cada configura\u00e7\u00e3o \u00e9 designada uma parcela da roleta proporcional ao n\u00famero de descendentes. Gera-se, ent\u00e3o, um n\u00famero aleat\u00f3rio entre 0 e 360 que permite identificar uma regi\u00e3o da roleta, e a configura\u00e7\u00e3o correspondente a essa regi\u00e3o \u00e9 que deve ter direito a gerar um descendente. O processo se repete n vezes at\u00e9 terminar a sele\u00e7\u00e3o.

- Sele\u00e7\u00e3o usando escalonamento linear: consiste em realizar uma transforma\u00e7\u00e3o linear das fun\u00e7\u00f5es de adapta\u00e7\u00e3o para melhorar a seletividade do processo, a fim de solucionar problemas de aparecimento de superconfigura\u00e7\u00f5es em suas fases

iniciais e a perda de seletividade em suas fases finais. Este processo de seleção deve ser finalizado usando qualquer proposta de seleção proporcional.

- Seleção usando ordenamento: o número de descendentes que corresponde a cada configuração depende de uma seleção ordenada das configurações, em ordem decrescente, dos valores das funções de adaptação para o problema de maximização e, em ordem invertida, para o problema de minimização. O número de descendentes também não é inteiro e, portanto, este processo de seleção deve ser finalizado usando a roleta ou uma proposta equivalente.
- Seleção usando torneio: são realizados n jogos, sendo n o tamanho da população. Em cada jogo, são selecionadas aleatoriamente k configurações diferentes da população corrente, e é escolhida aquela com o melhor valor da função de adaptação (melhor solução). O valor k é geralmente pequeno, tipicamente $k \in \{2, 3, 4, 5\}$. Após n jogos, o processo de seleção é terminado.

Durante o processo de seleção, podem-se utilizar algumas técnicas para a obtenção de configurações de melhor qualidade da nova população. Uma das técnicas adotadas é chamada na literatura de elitismo. O elitismo força o algoritmo genético a preservar os melhores indivíduos a cada geração, enquanto os filhos substituem os indivíduos menos adaptados. Os melhores indivíduos poderiam ser perdidos se não fossem selecionados para reprodução ou se fossem destruídos pelos operadores recombinação e mutação.

Durante o processo iterativo do algoritmo, preservam-se aquelas configurações que têm melhor qualidade e que são diferentes para formar o conjunto de elite global. Para esse conjunto, analisam-se todas as configurações de elite locais obtidas em cada iteração, e faz-se uma seleção daqueles indivíduos que possuem função objetivo de boa qualidade e cujas configurações são diferentes. Assim, o conjunto de elite global recebe configurações de boa qualidade do conjunto de elite local que não estão no conjunto de elite global. Trata-se de um conjunto ampliado de soluções incumbentes.

4.2.2 Recombinação

As configurações escolhidas no processo de seleção devem ser submetidas ao operador recombinação, ocorrendo troca de parcelas entre duas configurações para formar outras duas novas candidatas. Existem vários tipos de recombinação, e a diferença entre elas está no número de pontos de recombinação, podendo ser de um único ponto ou mais; o

número de pontos deve depender do número de elementos de uma configuração. Encontrar o número de pontos de recombinação mais adequado para um determinado tipo de problema é difícil de equacionar. Na prática, esse valor deve ser determinado de forma empírica, pela realização de testes experimentais.

A escolha de duas configurações para recombinação pode ser feita de forma aleatória ou de forma sistemática ou ordenada. Nem sempre, todas as configurações são submetidas à recombinação. Uma taxa de recombinação f_c determina, de forma aleatória, se duas configurações selecionadas devem ou não ser submetidas à recombinação. Assim, escolhida a taxa de recombinação f_c , os pares selecionados para recombinarem-se são submetidos a essa probabilidade. Desta forma, é gerado um número aleatório $p \in [0,1]$. Se esse número for menor que a taxa f_c preestabelecida, é realizada a recombinação.

4.2.3 Mutação

Após a recombinação, os cromossomos estão sujeitos à mutação. Este operador genético procura evitar atingir um mínimo local explorando novas zonas no espaço de busca do problema. O processo consiste em modificar a estrutura genética dos indivíduos de forma aleatória, alterando uma posição na cadeia de informações do cromossomo, diversificando a população e evitando uma convergência prematura para um ótimo local.

A taxa de mutação fornece a probabilidade de que um gene sofrerá mutação. Escolhida a taxa de mutação f_m , cada cromossomo é submetido a tal probabilidade. Deste modo, é gerado um número aleatório $p \in [0,1]$. Se esse número é menor que a taxa f_m preestabelecida, então é realizada a mutação.

4.2.4 Parâmetros de Controle

O ciclo geracional do algoritmo genético (seleção, recombinação e mutação) é realizado com base nos parâmetros de controle, que definem:

- Tamanho da população;
- Taxa de recombinação;
- Taxa de mutação.

O tamanho da população afeta o desempenho global e a eficiência dos algoritmos evolutivos. Com uma população pequena, o desempenho tende a cair, pois a população fornece uma pequena cobertura do espaço de busca do problema. Uma população grande, geralmente, fornece uma cobertura representativa do domínio do problema, além de prevenir convergências prematuras para soluções locais ao invés de globais.

Quanto maior a taxa de recombinação, mais rapidamente novas estruturas são introduzidas na população. Se ela for muito alta, no entanto, estruturas com boa qualidade poderão ser perdidas durante o processo. Com um valor muito baixo, o algoritmo torna-se muito lento. Uma alta taxa de mutação, por outro lado, previne que uma dada posição fique estagnada em um valor, além de abranger outras regiões do espaço de busca.

4.2.5 Critério de Parada

Existem vários critérios de parada que podem ser implementados. Assim, pode-se finalizar a execução do algoritmo genético quando:

- Um número específico de iterações foi executado;
- A solução incumbente (melhor solução encontrada) assume um valor de qualidade pelo menos igual a um valor previamente especificado;
- A solução incumbente não melhora durante um número específico de gerações;
- As configurações da população ficam muito homogêneas, isto é, as configurações são muito parecidas e praticamente já não existe evolução;
- Um critério que depende do tipo de problema analisado é empregado.

Na prática, vários critérios de parada simultâneos podem ser implementados, sendo os mesmos estáticos (previamente especificados) ou dinâmicos (dependem da evolução do processo). Em implementações práticas de problemas complexos, geralmente são especificados critérios de parada mais objetivos que dependem do tipo específico do problema.

4.3 Algoritmo Genético Dedicado à Alocação de Medidores de Tensão em Alimentadores de Distribuição

A seguir, são detalhados alguns dos aspectos mais relevantes do algoritmo genético desenvolvido para executar a alocação otimizada dos medidores de tensão a serem empregados no processo de localização de faltas.

4.3.1 Estrutura de Representação dos Cromossomos

Cada cromossomo, que é um indivíduo da população do algoritmo genético, representa uma proposta para a alocação dos medidores de tensão. Considerando que o alimentador tem N nós possíveis para a instalação dos medidores de tensão, como ilustrado na figura 4.1, no vetor que representa o cromossomo, a posição k , referente ao nó em que será alocado um medidor de tensão, recebe o valor 1; as posições nas quais não serão alocados medidores de tensão recebem o valor zero. Define-se, assim, uma representação binária para representar os cromossomos.

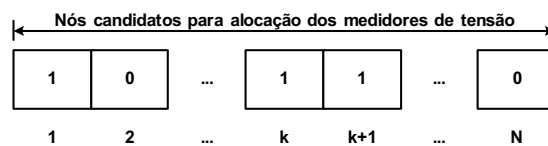


Figura 4.1 – Esquema proposto para a representação dos cromossomos.

4.3.2 Geração da População Inicial

Cada indivíduo da população é gerado de forma semi-aleatória. Para tanto, é considerada a possibilidade de alocar os medidores em qualquer um dos nós candidatos, desde que seja obedecida a restrição do número máximo preestabelecido de medidores que se permite alocar. Devido a restrições impostas pelo modelo definido na equação (4.1), pelo menos dois medidores devem ser instalados no alimentador. A quantidade máxima de medidores disponíveis para serem alocados é definida com base no investimento máximo disponível para ser empregado, tendo em vista melhorias na precisão da localização das faltas.

4.3.3 Função de Adaptação

A função de adaptação é composta pela função objetivo definida em (4.1) e por um fator de penalidade baseado na violação das restrições. Assim, é representada pela seguinte equação:

$$F_{adapt} = F.O. + \mu \cdot b \quad (4.2)$$

sendo:

$F.O.$: Função objetivo (4.1);

μ : Termo de penalidade relativa à violação da restrição do número máximo de medidores disponíveis para serem alocados;

b : Número de medidores excedendo o número máximo permitido.

4.3.4 Seleção

Elitismo e torneio são as técnicas empregadas no processo de seleção. Por intermédio do elitismo, a população é separada em dois subconjuntos, a saber: um contém uma porcentagem das melhores configurações da população corrente que compõem o subconjunto de configurações de elite; o outro contém configurações que não pertencem ao subconjunto de configurações de elite. A seleção por torneio é aplicada no segundo subconjunto anterior. Para isso, um conjunto de três cromossomos é aleatoriamente selecionado. O melhor entre esses cromossomos é selecionado para sofrer recombinação com um outro, também selecionado aleatoriamente, pertencente ao subconjunto de elite.

4.3.5 Recombinação e mutação

A recombinação empregada é a de um único ponto. Já a mutação adotada é a simples, na qual uma dada posição do vetor que representa o cromossomo é complementada.

4.3.6 Parâmetros de Controle

Os parâmetros de controle adotados para este problema, isto é, número de gerações, tamanho da população, taxas de recombinação e mutação, foram escolhidos considerando o número total de nós e as seções do alimentador e são baseados em análise de alguns testes executados. Taxas dinâmicas de recombinação e mutação são empregadas durante cada ciclo geracional do algoritmo genético, o que provoca a adaptação das mesmas durante o processo evolutivo.

4.3.7 Estratégia de Diversificação

A forte atração por ótimos locais originada por uma população submetida aos mecanismos de seleção é uma característica indesejada dos algoritmos evolucionários. Soluções de pior qualidade são, gradualmente, eliminadas por meio do processo de seleção, fazendo com que melhorias não sejam possíveis quando a diversidade da população atinge

níveis baixos, e levando a uma convergência prematura, devido à má exploração do espaço de busca.

Em virtude disso, neste trabalho, após o processo de recombinação, todas as configurações são analisadas, e, antes que o operador mutação seja empregado, um mecanismo é utilizado para que, de forma eficiente, o estado de saturação seja superado. Se o número de configurações que apresentam o mesmo valor para a função de adaptação é maior que um determinado percentual do total do número de configurações da população, isto é, se a diversidade da população é menor que um limite preestabelecido, então, uma alta taxa de mutação é usada para melhorar a diversidade da população. Esse mecanismo atua de forma a aumentar a média da função de adaptação. Após o estado de saturação ser superado, a taxa de mutação volta a ser um valor baixo.

4.3.8 Critério de Convergência

O critério de convergência compara as melhores soluções encontradas. Caso elas não apresentem melhorias durante um especificado número de iterações, assume-se que o processo convergiu. Em adição a esse critério, também é empregado o número máximo de iterações, para evitar que o processo se torne muito longo.

4.3.9 Diagrama de Blocos do AG Implementado

A figura 4.2 mostra a estrutura do AG implementado em forma de diagrama de blocos. As variáveis utilizadas neste diagrama são:

Q	: contador do número de gerações do AG;
Nit	: número máximo de gerações do AG;
$tc_{(q)}$: taxa de recombinação variável;
$tv_{(q)}$: taxa de mutação variável;
kc, kv	: constantes que dependem do número de variáveis de decisão do problema;
Div	: taxa de diversificação percentual;
Ceq	: número máximo de configurações iguais;
Np	: número total de configurações da população;
Tp	: valor para o qual a taxa de mutação deve ser elevada.

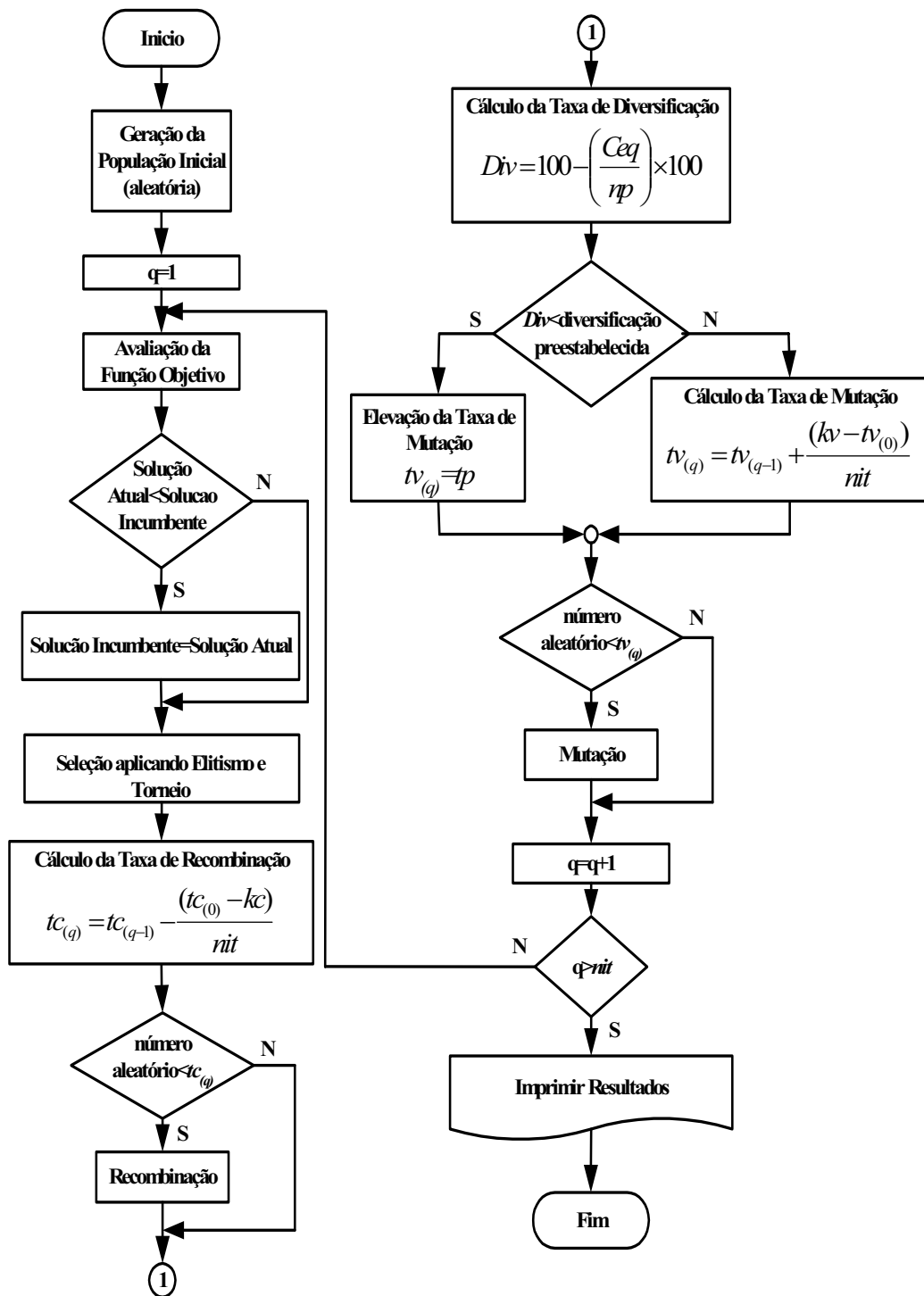


Figura 4.2 – Diagrama de blocos do AG implementado.

5 Resultados

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos com os testes realizados na implementação computacional do algoritmo de localização de faltas, proposto e detalhado no Capítulo 3, e do algoritmo para alocação otimizada dos medidores de tensão, proposto e detalhado no Capítulo 4. Os testes foram executados para um alimentador de distribuição trifásico, real, com 134 nós, tensão nominal de 13,8 kV e potência nominal de 7,065 MVA. Na figura 5.1, ilustra-se o diagrama unifilar desse alimentador e os pontos em que estão instalados os dispositivos de proteção. No apêndice A, encontram-se dados completos desse alimentador.

5.1 Condições de Testes

Os testes realizados visam mostrar a eficiência e robustez do algoritmo proposto para localização de faltas em alimentadores de distribuição reais. Desta forma, foram consideradas as seguintes condições de testes:

- As faltas a serem localizadas foram simuladas utilizando o *software* ATP. Nas simulações com o ATP, utilizou-se o modelo *RL* série para as linhas de distribuição, sendo que as capacitâncias *shunt* foram desprezadas e, por motivos de simplicidade de

representação, as cargas foram modeladas como impedâncias constantes. No apêndice B, exemplificam-se algumas partes do arquivo de entrada de dados para a condição de regime permanente e para a condição de falta, utilizados no ATP. Deve-se notar que, mesmo para a condição de falta, as simulações foram feitas desconsiderando o transitório da falta. Esse procedimento foi adotado porque toda a parte referente à aquisição e ao processamento dos sinais não é a ênfase principal deste trabalho de pesquisa. Assim, os fasores tensão e corrente utilizados não apresentam nenhum erro proveniente da aquisição e do processamento dos sinais.

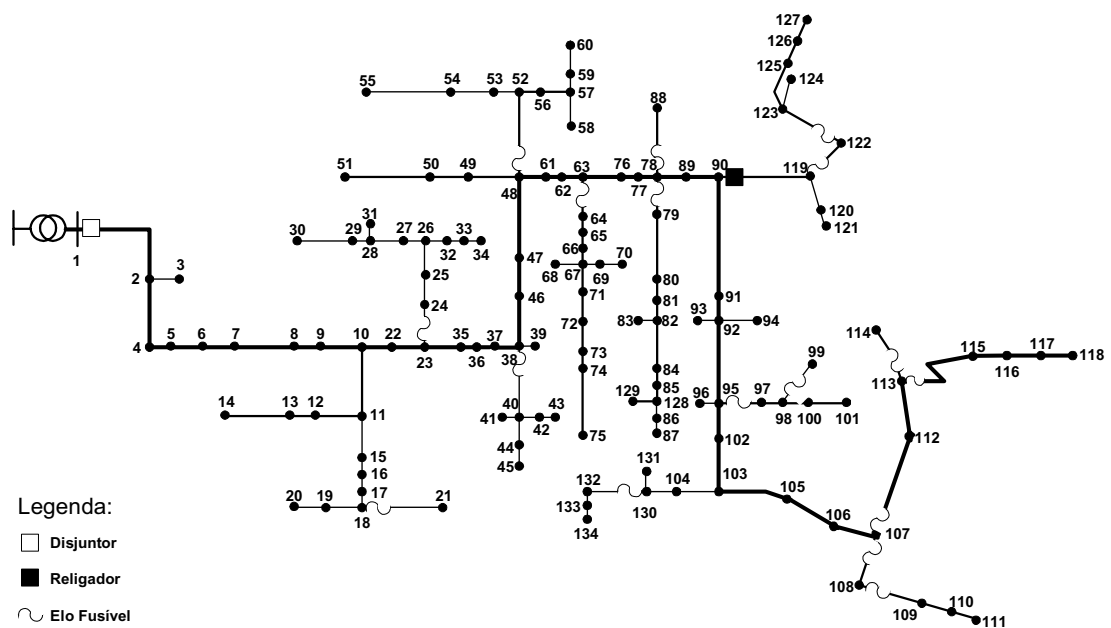


Figura 5.1 – Alimentador trifásico real com 134 nós.

– A ocorrência de faltas entre a fase A e a terra, dos nós 2 ao 134, e as resistências de faltas com valores de 0,5; 5,0 e 10,0 ohms. Desta forma, para cada valor de resistência de falta, 133 faltas foram simuladas no alimentador.

– Diversas condições de carregamento do alimentador, modelo de carga (potência constante, impedância constante, corrente constante ou combinado) e estimativa ou não do carregamento dos transformadores para ser utilizado no algoritmo. Assim como para as simulações no ATP, para o algoritmo de localização de faltas também foi utilizado o modelo *RL* série para as linhas de distribuição, e as capacitâncias *shunt* foram desprezadas foram consideradas.

– Baseado na dimensão do alimentador, optou-se por usar 4 medidores de tensão alocados ao longo do alimentador para fornecer os dados de medição de tensão necessários ao algoritmo de localização das faltas. Os medidores foram alocados de forma heurística nos nós 20, 81, 115 e 125, e, *a priori*, nenhuma consideração relacionada com uma possível alocação otimizada foi considerada.

5.2 Critérios para Análise de Resultados

A análise dos resultados é efetuada com base nos cálculos dos seguintes valores de erros: *i*) Erro percentual entre as distâncias do nó inicial ao verdadeiro local da falta e do nó inicial ao local da falta indicado pelo algoritmo, equação (5.1); e, *ii*) Erro absoluto entre as distâncias do nó inicial ao verdadeiro local da falta e do inicial ao local da falta indicado pelo algoritmo, equação (5.2). Esses erros são separados em classes de precisão, como mostra a tabela 5.1.

$$\varepsilon\% = \left| \frac{d_se_nf - d_se_nl}{d_se_nf} \right| * 100 \quad (5.1)$$

$$\varepsilon = |d_se_nf - d_se_nl| \quad (5.2)$$

sendo:

d_se_nf : distância entre o nó inicial do alimentador na subestação e o nó em falta;

d_se_nl : distância entre o nó inicial do alimentador na subestação e o nó em falta

localizado pelo algoritmo.

Tabela 5.1 – Classes de erros percentuais e absolutos para as distâncias adotadas na análise dos resultados do algoritmo.

Classes para erros percentuais	Classes para erros na distância (m)		
$0 \leq \varepsilon\% \leq 5\%$	$0 \leq \varepsilon \leq 50$	$350 < \varepsilon \leq 400$	$700 < \varepsilon \leq 750$
$5 < \varepsilon\% \leq 10\%$	$50 < \varepsilon \leq 100$	$400 < \varepsilon \leq 450$	$750 < \varepsilon \leq 800$
$10 < \varepsilon\% \leq 15\%$	$100 < \varepsilon \leq 150$	$450 < \varepsilon \leq 500$	$\varepsilon > 800$
$15 < \varepsilon\% \leq 20\%$	$150 < \varepsilon \leq 200$	$500 < \varepsilon \leq 550$	
$20 < \varepsilon\% \leq 25\%$	$200 < \varepsilon \leq 250$	$550 < \varepsilon \leq 600$	
$25 < \varepsilon\% \leq 30\%$	$250 < \varepsilon \leq 300$	$600 < \varepsilon \leq 650$	
$30 < \varepsilon\% \leq 100\%$	$300 < \varepsilon \leq 350$	$650 < \varepsilon \leq 700$	

5.3 Descrição, resultados e discussões dos testes realizados

A seguir, estão detalhados os 26 testes realizados e os resultados obtidos, considerando o que foi descrito nas subseções 5.1 e 5.2.

5.3.1 Influência da resistência de falta na precisão do algoritmo sob condições ideais de carregamento

Nos testes 1, 2 e 3, apresentados e discutidos a seguir, busca-se verificar a influência da resistência de falta no desempenho do algoritmo para localizar o ponto em falta, quando as mesmas condições de carregamento e modelo de cargas são considerados na simulação das faltas no *software* ATP e no algoritmo de localização de faltas utilizando a técnica proposta.

Teste 1 – As condições de teste são:

Para a simulação das faltas:

- Resistência de falta igual a 0,5 ohms;
- Transformadores com carregamento de 100% (carga nominal);
- Cargas modeladas como impedâncias constantes.

Para a localização das faltas:

- Transformadores com carregamento de 100% (carga nominal);
- Cargas modeladas como impedâncias constantes.

As condições para este teste podem ser consideradas como sendo ideais, uma vez que se adotou o mesmo modelo de carga e a potência complexa ($|S| = |S_{nom}|$ e $\cos\phi = 0,92$) em cada transformador no ATP e no algoritmo de localização de faltas.

Para este teste, as 133 faltas foram localizadas com 100% de precisão, isto é, em cada uma das simulações, o verdadeiro nó em falta foi indicado como sendo o primeiro do *ranking* de nós candidatos fornecido pelo algoritmo proposto.

Teste 2 – As condições de teste são:

Para a simulação das faltas:

- Resistência de falta igual a 5,0 ohms;
- Transformadores com carregamento de 100% (carga nominal);
- Cargas modeladas como impedâncias constantes.

Para a localização das faltas:

- Transformadores com carregamento de 100% (carga nominal);
- Cargas modeladas como impedâncias constantes.

Dentro das condições adotadas acima, pode-se considerar este como sendo o caso ideal, em que o modelo de carga e a potência complexa ($|S| = |S_{nom}|$ e $\cos\phi = 0,92$) utilizados

para cada transformador foram os mesmos tanto no ATP como no algoritmo de localização de faltas.

De forma análoga ao que foi observado no *teste 1*, as 133 faltas foram localizadas com 100% de precisão, isto é, em cada uma das simulações, o verdadeiro nó em falta foi indicado como sendo o primeiro do *ranking* de nós candidatos fornecido pelo algoritmo proposto.

Teste 3 – As condições de teste são:

Para a simulação das faltas:

- Resistência de falta igual a 10,0 ohms;
- Transformadores com carregamento de 100% (carga nominal);
- Cargas modeladas como impedâncias constantes.

Para a localização das faltas:

- Transformadores com carregamento de 100% (carga nominal);
- Cargas modeladas como impedâncias constantes.

Dentro das condições adotadas acima, pode-se considerar este teste como sendo o caso ideal em que o modelo de carga e a potência complexa ($|S| = |S_{nom}|$ e $\cos\phi = 0,92$) utilizados para cada transformador foram os mesmos tanto no ATP como no algoritmo de localização de faltas.

Analogamente aos resultados dos *testes 1* e *2*, as 133 faltas foram localizadas com 100% de precisão, isto é, em cada uma das simulações, o verdadeiro nó em falta foi indicado como sendo o primeiro do *ranking* de nós candidatos fornecido pelo algoritmo proposto.

Analisando os testes 1, 2 e 3, conclui-se que para situações ideais, isto é, utilizando o mesmo carregamento e o mesmo modelo de carga no algoritmo de localização de faltas e na simulação das faltas no ATP, a precisão do algoritmo de localização de faltas não sofre influência do valor da resistência de falta.

5.3.2 Influência da resistência de falta e do modelo de cargas na precisão do algoritmo

Nos testes 4, 5 e 6, apresentados e discutidos a seguir, busca-se verificar a influência da variação da resistência de falta e do modelo de carga adotado no algoritmo de localização de faltas, considerando o mesmo carregamento nas simulações das faltas e no algoritmo de localização de faltas.

Teste 4 – As condições de teste são:

Para a simulação das faltas:

- Resistência de falta igual a 0,5 ohms;
- Transformadores com carregamento de 100% (carga nominal);
- Cargas modeladas como impedâncias constantes.

Para a localização das faltas:

- Transformadores com carregamento de 100% (carga nominal);
- Cargas modeladas como correntes constantes.

Nas tabelas 5.2 e 5.3 e nos gráficos 5.1 e 5.2, apresentam-se os resultados para o teste

4.

Tabela 5.2 – Quantidade de nós localizados para cada classe de erro percentual.

Faixas para o erro percentual na distância	Quantidade de nós localizados
$0 \leq \varepsilon\% \leq 5\%$	56
$5 < \varepsilon\% \leq 10\%$	36
$10 < \varepsilon\% \leq 15\%$	23
$15 < \varepsilon\% \leq 20\%$	5
$20 < \varepsilon\% \leq 25\%$	2
$25 < \varepsilon\% \leq 30\%$	3
$30 < \varepsilon\% \leq 100\%$	8

Tabela 5.3 – Quantidade de nós localizados para cada classe de erro na distância.

Faixas para o erro na distância (m)	Quantidade de nós localizados
$0 \leq \varepsilon \leq 50$	27
$50 < \varepsilon \leq 100$	24
$100 < \varepsilon \leq 150$	14
$150 < \varepsilon \leq 200$	17
$200 < \varepsilon \leq 250$	21
$250 < \varepsilon \leq 300$	10
$300 < \varepsilon \leq 350$	3
$350 < \varepsilon \leq 400$	1
$400 < \varepsilon \leq 450$	5
$450 < \varepsilon \leq 500$	3
$500 < \varepsilon \leq 550$	5
$550 < \varepsilon \leq 600$	1
$600 < \varepsilon \leq 650$	1
$650 < \varepsilon \leq 700$	1

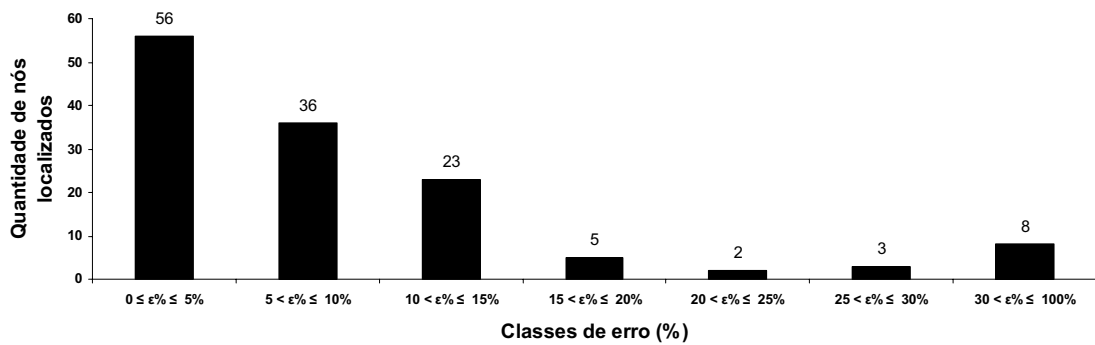


Gráfico 5.1 – Quantidade de nós localizados por classe de erro percentual.

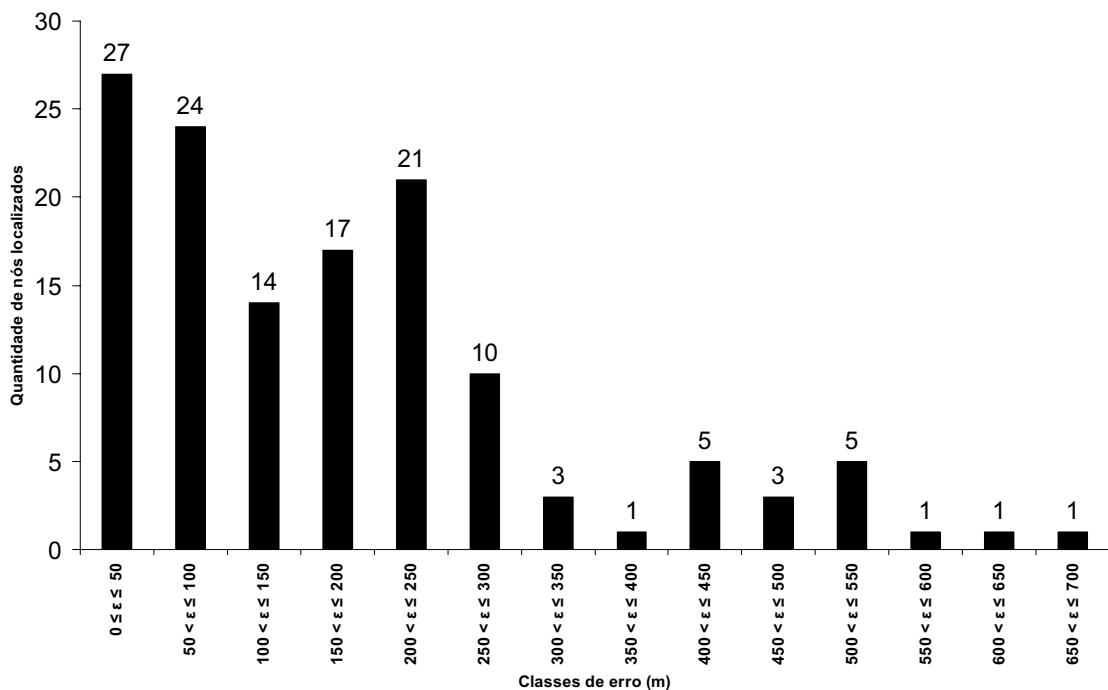


Gráfico 5.2 - Número de nós localizados por classe de erro absoluto.

Teste 5 – As condições de teste são:

Para a simulação das faltas:

- Resistência de falta igual a 5,0 ohms;
- Transformadores com carregamento de 100% (carga nominal);
- Cargas modeladas como impedâncias constantes.

Para a localização das faltas:

- Transformadores com carregamento de 100% (carga nominal);
- Cargas modeladas como correntes constantes.

Nas tabelas 5.4 e 5.5 e nos gráficos 5.3 e 5.4, apresentam-se os resultados para o teste 5.

Tabela 5.4 – Quantidade de nós localizados para cada classe de erro percentual.

Faixas para o erro percentual na distância	Quantidade de nós localizados
$0 \leq \varepsilon\% \leq 5\%$	72
$5 < \varepsilon\% \leq 10\%$	37
$10 < \varepsilon\% \leq 15\%$	14
$15 < \varepsilon\% \leq 20\%$	5
$30 < \varepsilon\% \leq 100\%$	5

Tabela 5.5 – Quantidade de nós localizados para cada classe de erro na distância.

Faixas para o erro na distância (m)	Quantidade de nós localizados
$0 \leq \varepsilon \leq 50$	40
$50 < \varepsilon \leq 100$	25
$100 < \varepsilon \leq 150$	17
$150 < \varepsilon \leq 200$	22
$200 < \varepsilon \leq 250$	10
$250 < \varepsilon \leq 300$	7
$300 < \varepsilon \leq 350$	4
$350 < \varepsilon \leq 400$	1
$400 < \varepsilon \leq 450$	1
$450 < \varepsilon \leq 500$	1
$600 < \varepsilon \leq 650$	1
$650 < \varepsilon \leq 700$	2
$700 < \varepsilon \leq 750$	1
$750 < \varepsilon \leq 800$	1

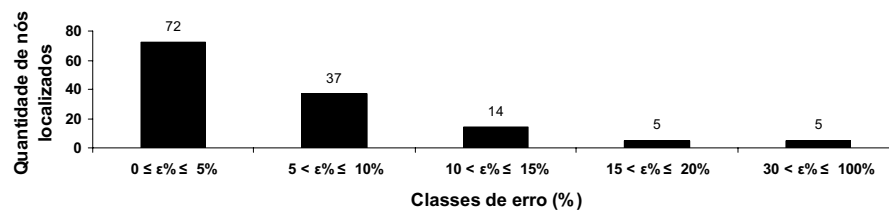


Gráfico 5.3 – Quantidade de nós localizados para cada classe de erro percentual.

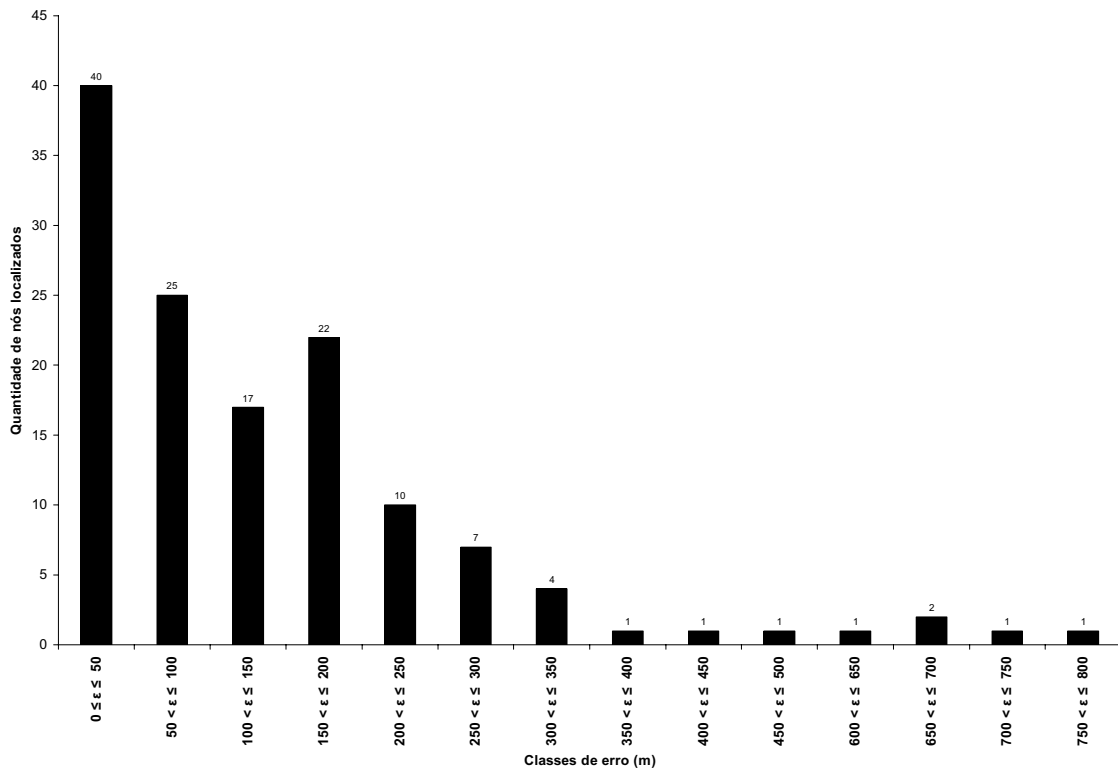


Gráfico 5.4 – Número de nós localizados para cada classe de erro absoluto.

Teste 6 – As condições de teste são:

Para a simulação das faltas:

- Resistência de falta igual a 10,0 ohms;
- Transformadores com carregamento de 100% (carga nominal);
- Cargas modeladas como impedâncias constantes.

Para a localização das faltas:

- Transformadores com carregamento de 100% (carga nominal);
- Cargas modeladas como correntes constantes.

Nas tabelas 5.6 e 5.7 e nos gráficos 5.5 e 5.6, apresentam-se os resultados para o teste

6.

Tabela 5.6 – Quantidade de nós localizados para cada classe de erro percentual.

Faixas para o erro percentual na distância	Quantidade de nós localizados
$0 \leq \varepsilon\% \leq 5\%$	70
$5 < \varepsilon\% \leq 10\%$	32
$10 < \varepsilon\% \leq 15\%$	18
$15 < \varepsilon\% \leq 20\%$	8
$30 < \varepsilon\% \leq 100\%$	5

Tabela 5.7 – Quantidade de nós localizados para cada classe de erro na distância.

Faixas para o erro na distância (m)	Quantidade de nós localizados
$0 < \varepsilon \leq 50$	37
$50 < \varepsilon \leq 100$	27
$100 < \varepsilon \leq 150$	13
$150 < \varepsilon \leq 200$	18
$200 < \varepsilon \leq 250$	11
$250 < \varepsilon \leq 300$	10
$300 < \varepsilon \leq 350$	7
$350 < \varepsilon \leq 400$	2
$400 < \varepsilon \leq 450$	2
$450 < \varepsilon \leq 500$	1
$600 < \varepsilon \leq 650$	1
$650 < \varepsilon \leq 700$	2
$700 < \varepsilon \leq 750$	1
$750 < \varepsilon \leq 800$	1

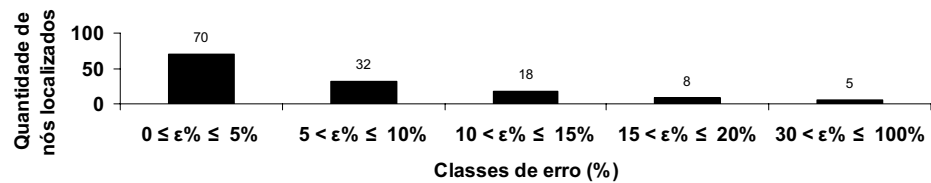


Gráfico 5.5 – Quantidade de nós localizados para cada classe de erro percentual.

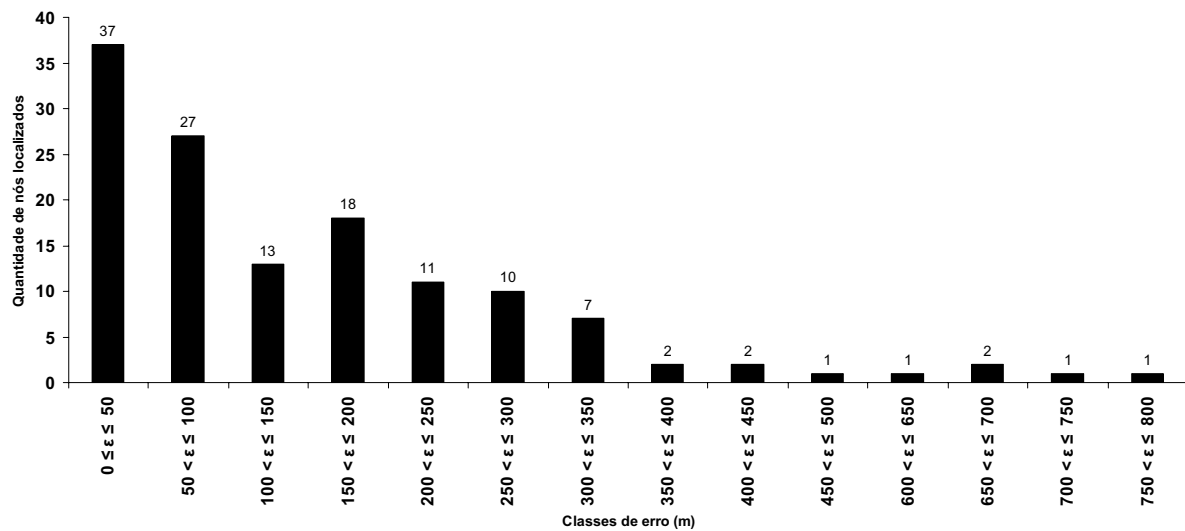


Gráfico 5.6 – Número de nós localizados para cada classe de erro absoluto.

Analisando as tabelas 5.2 a 5.7 e os gráficos 5.1 a 5.6, observa-se que o algoritmo proposto apresentou maiores desvios nos resultados para a resistência de falta igual a $0,5 \Omega$. Para valores de resistências de falta iguais a $5,0 \Omega$ e $10,0 \Omega$, verificou-se que o algoritmo proposto apresenta resultados semelhantes. Assim, dentro das considerações adotadas para os

testes 4, 5 e 6, verifica-se que quanto mais próximo de zero for o valor da resistência de falta, maior será o erro na precisão do algoritmo proposto.

5.3.3 Influência da resistência de falta, do modelo de cargas e da proposta para estimativa do carregamento dos transformadores na precisão do algoritmo

Nos testes de 7 a 13, busca-se verificar a influência da variação da resistência de falta, da proposta apresentada na subseção 3.4 para a estimativa do carregamento dos transformadores e do modelo de carga adotada no algoritmo de localização de faltas.

Teste 7 – As condições de teste são:

Para a simulação das faltas:

- Resistência de falta igual a 0,5 ohms;
- Transformadores com carregamento de 100% (carga nominal);
- Cargas modeladas como impedâncias constantes.

Para a localização das faltas:

- Transformadores com carregamento estimado de acordo com a subseção 3.4 e $\beta_i = 1,0$;
- Cargas modeladas como correntes constantes.

Nas tabelas 5.8 e 5.9 e nos gráficos 5.7 e 5.8, apresentam-se os resultados para o teste 7.

Tabela 5.8 – Quantidade de nós localizados para cada classe de erro percentual.

Faixas para o erro percentual na distância	Quantidade de nós localizados
$0 \leq \varepsilon\% \leq 5\%$	58
$5 < \varepsilon\% \leq 10\%$	36
$10 < \varepsilon\% \leq 15\%$	19
$15 < \varepsilon\% \leq 20\%$	5
$20 < \varepsilon\% \leq 25\%$	3
$25 < \varepsilon\% \leq 30\%$	4
$30 < \varepsilon\% \leq 100\%$	8

Tabela 5.9 – Quantidade de nós localizados para cada classe de erro na distância.

Faixas para o erro na distância (m)	Quantidade de nós localizados
$0 \leq \varepsilon \leq 50$	28
$50 < \varepsilon \leq 100$	23
$100 < \varepsilon \leq 150$	14
$150 < \varepsilon \leq 200$	18
$200 < \varepsilon \leq 250$	19
$250 < \varepsilon \leq 300$	9
$300 < \varepsilon \leq 350$	3
$350 < \varepsilon \leq 400$	2
$400 < \varepsilon \leq 450$	5
$450 < \varepsilon \leq 500$	4
$500 < \varepsilon \leq 550$	5
$550 < \varepsilon \leq 600$	1
$600 < \varepsilon \leq 650$	2

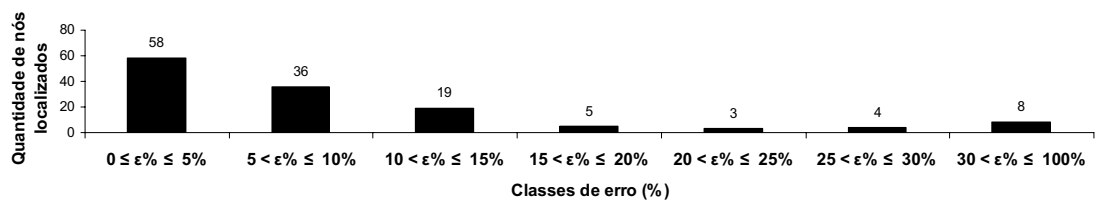


Gráfico 5.7 – Quantidade de nós localizados para cada classe de erro percentual.

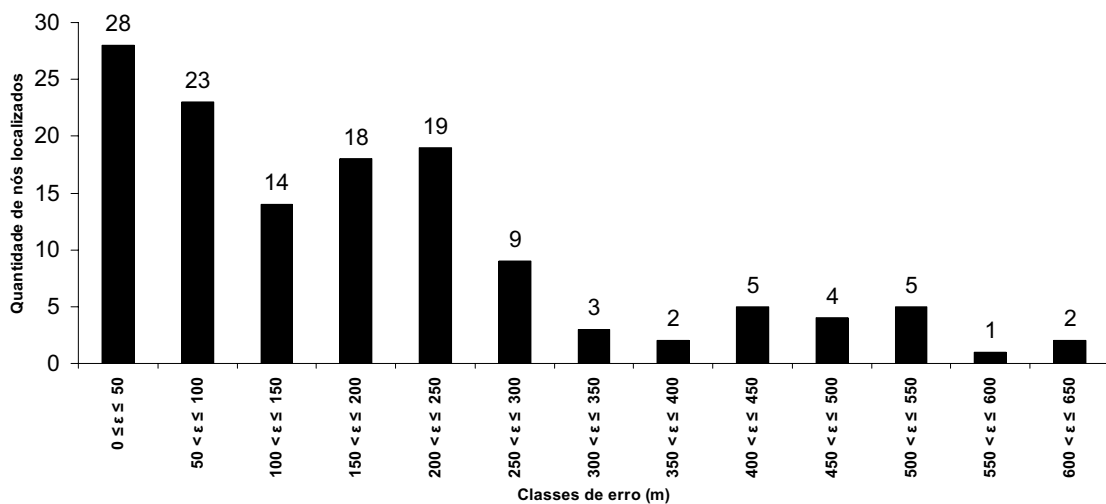


Gráfico 5.8 – Número de nós localizados para cada classe de erro absoluto.

Teste 8 – As condições de teste são:

Para a simulação das faltas:

- Resistência de falta igual a 5,0 ohms;
- Transformadores com carregamento de 100% (carga nominal);
- Cargas modeladas como impedâncias constantes.

Para a localização das faltas:

- Transformadores com carregamento estimado de acordo com a subseção 3.4 e $\beta_i = 1,0$;
- Cargas modeladas como correntes constantes.

Nas tabelas 5.10 e 5.11 e nos gráficos 5.9 e 5.10, apresentam-se os resultados para o teste 8.

Tabela 5.10 – Quantidade de nós localizados para cada classe de erro percentual.

Faixas para o erro percentual na distância	Quantidade de nós localizados
$0 \leq \epsilon\% \leq 5\%$	77
$5 < \epsilon\% \leq 10\%$	33
$10 < \epsilon\% \leq 15\%$	12
$15 < \epsilon\% \leq 20\%$	6
$30 < \epsilon\% \leq 100\%$	5

Tabela 5.11 – Quantidade de nós localizados para cada classe de erro na distância.

Faixas para o erro na distância (m)	Quantidade de nós localizados
$0 \leq \epsilon \leq 50$	44
$50 < \epsilon \leq 100$	27
$100 < \epsilon \leq 150$	17
$150 < \epsilon \leq 200$	17
$200 < \epsilon \leq 250$	10
$250 < \epsilon \leq 300$	6
$300 < \epsilon \leq 350$	5
$350 < \epsilon \leq 400$	1
$450 < \epsilon \leq 500$	1
$600 < \epsilon \leq 650$	1
$650 < \epsilon \leq 700$	2
$700 < \epsilon \leq 750$	1
$750 < \epsilon \leq 800$	1

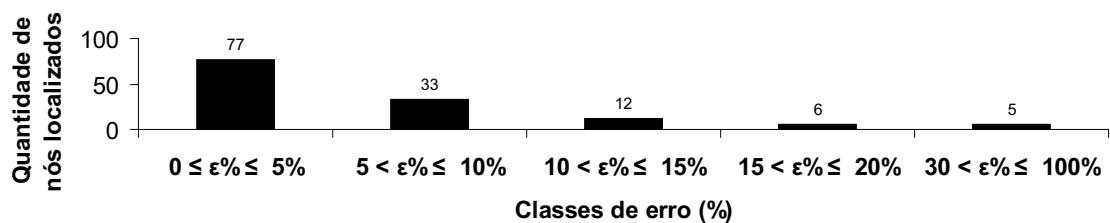


Gráfico 5.9 – Quantidade de nós localizados para cada classe de erro percentual.

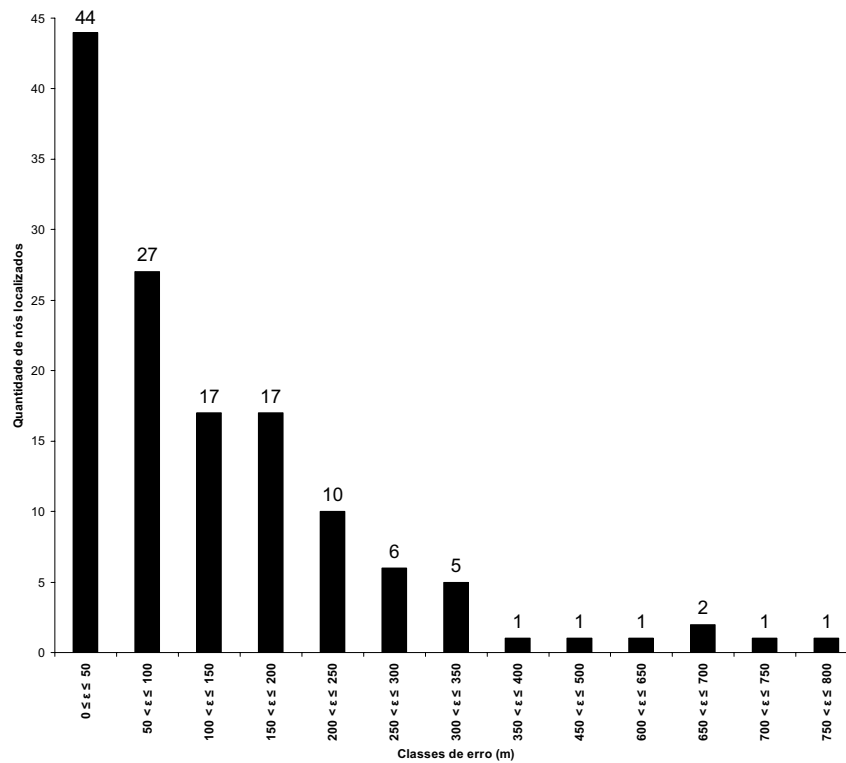


Gráfico 5.10 – Número de nós localizados para cada classe de erro absoluto.

Teste 9 – As condições de teste são:

Para a simulação das faltas:

- Resistência de falta igual a 10,0 ohms;
- Transformadores com carregamento de 100% (carga nominal);
- Cargas modeladas como impedâncias constantes.

Para a localização das faltas:

- Transformadores com carregamento estimado de acordo com a subseção 3.4 e $\beta_i = 1,0$;
- Cargas modeladas como correntes constantes.

Nas tabelas 5.12 e 5.13 e nos gráficos 5.11 e 5.12, apresentam-se os resultados para o teste 9.

Tabela 5.12 – Quantidade de nós localizados para cada classe de erro percentual.

Faixas para o erro percentual na distância	Quantidade de nós localizados
$0 \leq \varepsilon\% \leq 5\%$	78
$5 < \varepsilon\% \leq 10\%$	30
$10 < \varepsilon\% \leq 15\%$	14
$15 < \varepsilon\% \leq 20\%$	6
$30 < \varepsilon\% \leq 100\%$	5

Tabela 5.13 – Quantidade de nós localizados para cada classe de erro na distância.

Faixas para o erro na distância (m)	Quantidade de nós localizados
$0 \leq \varepsilon \leq 50$	47
$50 < \varepsilon \leq 100$	27
$100 < \varepsilon \leq 150$	14
$150 < \varepsilon \leq 200$	16
$200 < \varepsilon \leq 250$	11
$250 < \varepsilon \leq 300$	6
$300 < \varepsilon \leq 350$	5
$350 < \varepsilon \leq 400$	1
$450 < \varepsilon \leq 500$	1
$600 < \varepsilon \leq 650$	1
$650 < \varepsilon \leq 700$	2
$700 < \varepsilon \leq 750$	1
$750 < \varepsilon \leq 800$	1

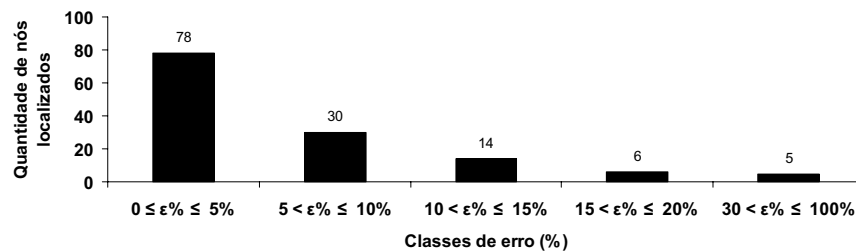


Gráfico 5.11 – Quantidade de nós localizados para cada classe de erro percentual.

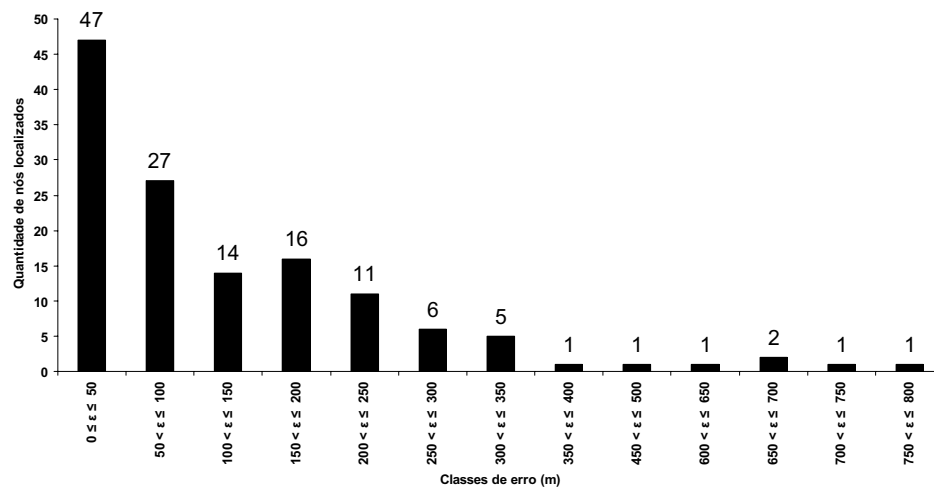


Gráfico 5.12 – Número de nós localizados para cada classe de erro absoluto.

Teste 10 – As condições de teste são:

Para a simulação das faltas:

- Resistência de falta igual a 5,0 ohms;
- Transformadores com carregamento de 100% (carga nominal);
- Cargas modeladas como impedâncias constantes.

Para a localização das faltas:

- Transformadores com carregamento estimado de acordo com a subseção 3.4 e $\beta_i = 1,0$;
- Cargas modeladas como potências constantes.

Nas tabelas 5.14 e 5.15 e nos gráficos 5.13 e 5.14, apresentam-se os resultados para o teste 10.

Tabela 5.14 – Quantidade de nós localizados para cada classe de erro percentual.

Faixas para o erro percentual na distância	Quantidade de nós localizados
$0 \leq \varepsilon\% \leq 5\%$	62
$5 < \varepsilon\% \leq 10\%$	29
$10 < \varepsilon\% \leq 15\%$	17
$15 < \varepsilon\% \leq 20\%$	8
$30 < \varepsilon\% \leq 100\%$	17

Tabela 5.15 – Quantidade de nós localizados para cada classe de erro na distância.

Faixas para o erro na distância (m)	Quantidade de nós localizados
$0 \leq \varepsilon \leq 50$	26
$50 < \varepsilon \leq 100$	28
$100 < \varepsilon \leq 150$	15
$150 < \varepsilon \leq 200$	16
$200 < \varepsilon \leq 250$	9
$250 < \varepsilon \leq 300$	7
$300 < \varepsilon \leq 350$	4
$350 < \varepsilon \leq 400$	4
$400 < \varepsilon \leq 450$	5
$450 < \varepsilon \leq 500$	2
$600 < \varepsilon \leq 650$	1
$650 < \varepsilon \leq 700$	2
$700 < \varepsilon \leq 750$	1
$750 < \varepsilon \leq 800$	1
$\varepsilon > 800$	12

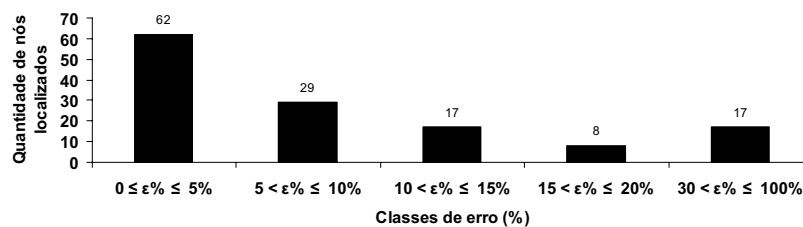


Gráfico 5.13 – Quantidade de nós localizados para cada classe de erro percentual.

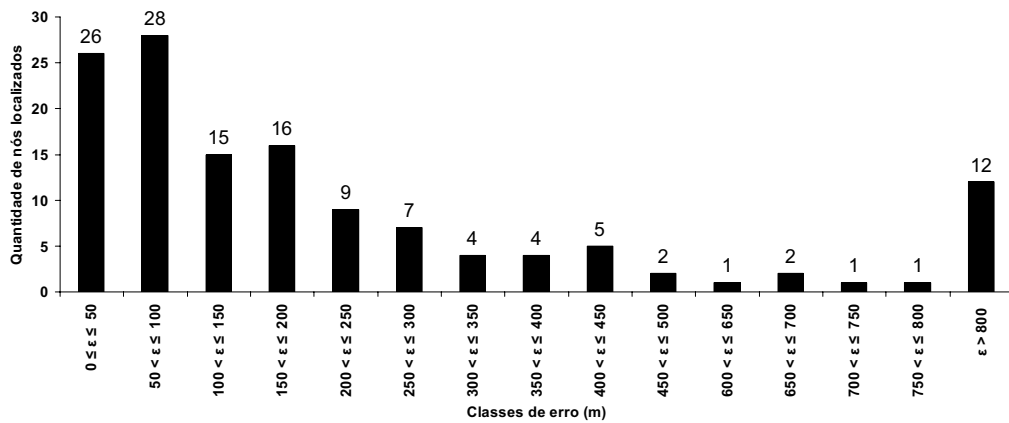


Gráfico 5.14 – Número de nós localizados para cada classe de erro absoluto.

Teste 11 – As condições de teste são:

Para a simulação das faltas:

- Resistência de falta igual a 10,0 ohms;
- Transformadores com carregamento de 100% (carga nominal);
- Cargas modeladas como impedâncias constantes.

Para a localização das faltas:

- Transformadores com carregamento estimado de acordo com a subseção 3.4 e $\beta_i = 1,0$;
- Cargas modeladas como potências constantes.

Nas tabelas 5.16 e 5.17 e nos gráficos 5.15 e 5.16, apresentam-se os resultados para o teste 11.

Tabela 5.16 – Quantidade de nós localizados para cada classe de erro percentual.

Faixas para o erro percentual na distância	Quantidade de nós localizados
$0 \leq \varepsilon\% \leq 5\%$	71
$5 < \varepsilon\% \leq 10\%$	29
$10 < \varepsilon\% \leq 15\%$	22
$15 < \varepsilon\% \leq 20\%$	6
$30 < \varepsilon\% \leq 100\%$	4

Tabela 5.17 – Quantidade de nós localizados para cada classe de erro na distância.

Faixas para o erro na distância (m)	Quantidade de nós localizados
$0 < \varepsilon \leq 50$	34
$50 < \varepsilon \leq 100$	29
$100 < \varepsilon \leq 150$	12
$150 < \varepsilon \leq 200$	17
$200 < \varepsilon \leq 250$	11
$250 < \varepsilon \leq 300$	9
$300 < \varepsilon \leq 350$	6
$350 < \varepsilon \leq 400$	5
$400 < \varepsilon \leq 450$	4
$450 < \varepsilon \leq 500$	1
$600 < \varepsilon \leq 650$	1
$650 < \varepsilon \leq 700$	2
$700 < \varepsilon \leq 750$	1
$750 < \varepsilon \leq 800$	1

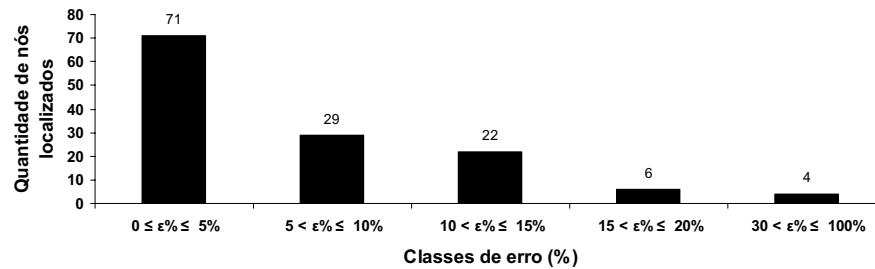


Gráfico 5.15 – Quantidade de nós localizados para cada classe de erro percentual.

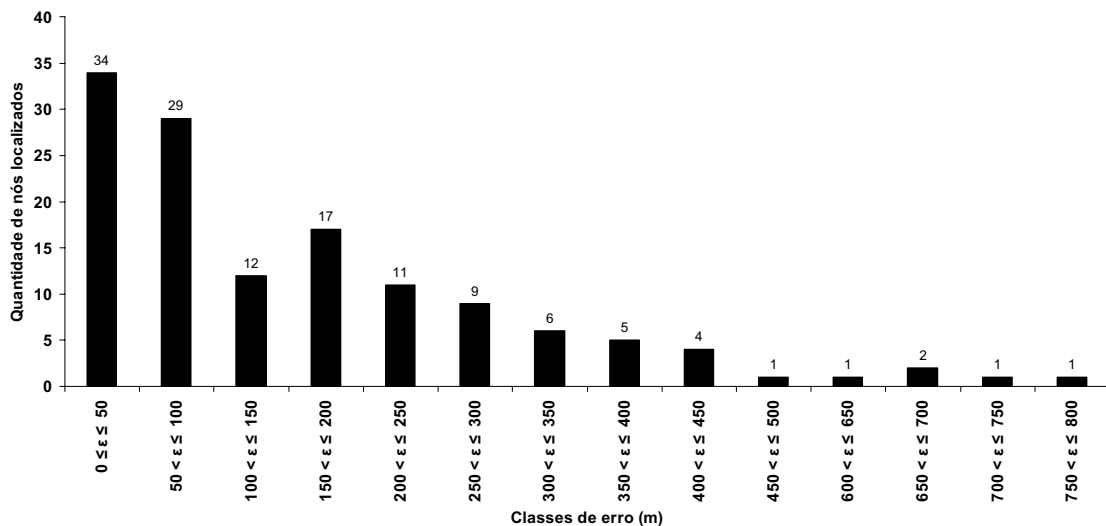


Gráfico 5.16 – Número de nós localizados para cada classe de erro absoluto.

Teste 12 – As condições de teste são:

Para a simulação das faltas:

- Resistência de falta igual a 0,50 ohms;

- Transformadores com carregamento de 50% da carga nominal;
- Cargas modeladas como impedâncias constantes.

Para a localização das faltas:

- Transformadores com carregamento estimado de acordo com a subseção 3.4 e $\beta_i = 1,0$;
- Cargas modeladas como impedâncias constantes.

Nas tabelas 5.18 e 5.19, apresentam-se os resultados para o teste 12.

Tabela 5.18 – Quantidade de nós localizados para cada classe de erro percentual.

Faixas para o erro percentual na distância	Quantidade de nós localizados
$0 \leq \varepsilon\% \leq 5\%$	132
$5 < \varepsilon\% \leq 10\%$	1

Tabela 5.19 – Quantidade de nós localizados para cada classe de erro na distância.

Faixas para o erro na distância (m)	Quantidade de nós localizados
$0 \leq \varepsilon \leq 50$	131
$50 < \varepsilon \leq 100$	1
$100 < \varepsilon \leq 150$	1

Teste 13 – As condições de teste são:

Para a simulação das faltas:

- Resistência de falta igual a 10,0 ohms;
- Transformadores com carregamento de 50% da carga nominal;
- Cargas modeladas como impedâncias constantes.

Para a localização das faltas:

- Transformadores com carregamento estimado de acordo com a subseção 3.4 e $\beta_i = 1,0$;
- Cargas modeladas como impedâncias constantes.

Nas tabelas 5.20 e 5.21, apresentam-se os resultados para o teste 13.

Tabela 5.20 – Quantidade de nós localizados para cada classe de erro percentual.

Faixas para o erro percentual na distância	Quantidade de nós localizados
$0 \leq \varepsilon\% \leq 5\%$	128
$5 < \varepsilon\% \leq 10\%$	5

Tabela 5.21 – Quantidade de nós localizados para cada classe de erro na distância.

Faixas para o erro na distância (m)	Quantidade de nós localizados
$0 < \varepsilon \leq 50$	124
$50 < \varepsilon \leq 100$	4
$100 < \varepsilon \leq 150$	4
$150 < \varepsilon \leq 200$	1

Analisando as tabelas 5.8 a 5.13 e os gráficos 5.7 a 5.12, referentes aos testes 7, 8 e 9, observa-se que o algoritmo proposto apresentou maiores desvios nos resultados para a resistência de falta igual a $0,5 \Omega$. Para valores de resistências de falta iguais a $5,0 \Omega$ e $10,0 \Omega$, verificam-se resultados semelhantes. Assim, dentro das considerações adotadas para esses testes, conclui-se que quanto mais próximo de zero for o valor da resistência de falta, maior é o erro na precisão dos resultados obtidos.

As tabelas 5.14 a 5.17 e os gráficos 5.13 a 5.16, testes 10 e 11, confirmam a tendência do algoritmo proposto sofrer menor influência para valores elevados de resistências de faltas, porém fora do contexto de faltas de alta impedância. Esses testes mostram, ainda, que o algoritmo proposto apresenta problemas de convergência quando a localização das faltas é executada considerando o modelo de potência constante para as cargas. Deve-se observar que as faltas no ATP foram simuladas com cargas modeladas como impedâncias constantes, e uso do modelo de potência constante para as cargas, no algoritmo de localização de faltas, faz com que as correntes das cargas, equação (2.11), tenham suas magnitudes aumentadas para a condição de falta. Esse aumento das correntes das cargas se verifica, pois, durante a falta, o valor da tensão nos nós do alimentador é reduzido devido à presença da corrente de falta.

As tabelas 5.18 a 5.21, testes 12 e 13, mostram que o algoritmo de localização de faltas proposto é sensível ao aumento do valor da resistência de faltas quando o modelo de carga adotado durante o processo de localização de faltas é o mesmo utilizado para a simulação das faltas e existem erros na estimativa do carregamento dos transformadores do alimentador. Para esses testes, o carregamento dos transformadores durante o processo de localização de faltas não é calculado de forma exata. O carregamento foi estimado empregando-se a proposta apresentada na subseção 3.4, a qual considera que todos os transformadores têm o mesmo fator de potência medido no nó inicial do alimentador e que o carregamento de cada transformador é proporcional à sua potência nominal.

5.3.4 Influência da resistência de falta, do modelo combinado das cargas e da proposta para estimativa do carregamento dos transformadores na precisão do algoritmo

Nos testes 14 a 21, apresentados a seguir, busca-se verificar a influência da variação da resistência de falta, da consideração do modelo combinado para as cargas e da variação do carregamento do alimentador. Para ser utilizado no algoritmo de localização de faltas o carregamento de cada transformador foi estimado de acordo com a subseção 3.4.

Teste 14 – As condições de teste são:

Para a simulação das faltas:

- Resistência de falta igual a 5,0 ohms;
- Transformadores com carregamento de 25% da carga nominal;
- Cargas modeladas como impedâncias constantes.

Para a localização das faltas:

- Transformadores com carregamento estimado de acordo com a subseção 3.4 e $\beta_i = 1,0$;
- Modelo combinado de carga, equação (2.27), com $\alpha = 33,0$; $\beta = 34,0$ e $\delta = 33,0$.

Nas tabelas 5.22 e 5.23 e os gráficos 5.17 e 5.18, apresentam-se os resultados obtidos para o teste 14.

Tabela 5.22 – Quantidade de nós localizados para cada classe de erro percentual.

Faixas para o erro percentual na distância	Quantidade de nós localizados
$0 \leq \varepsilon\% \leq 5\%$	71
$5 < \varepsilon\% \leq 10\%$	37
$10 < \varepsilon\% \leq 15\%$	15
$15 < \varepsilon\% \leq 20\%$	5
$20 < \varepsilon\% \leq 25\%$	1
$30 < \varepsilon\% \leq 100\%$	4

Tabela 5.23 – Quantidade de nós localizados para cada classe de erro na distância.

Faixas para o erro na distância (m)	Quantidade de nós localizados
$0 \leq \varepsilon \leq 50$	54
$50 < \varepsilon \leq 100$	14
$100 < \varepsilon \leq 150$	16
$150 < \varepsilon \leq 200$	15
$200 < \varepsilon \leq 250$	14
$250 < \varepsilon \leq 300$	8
$300 < \varepsilon \leq 350$	5
$350 < \varepsilon \leq 400$	2
$450 < \varepsilon \leq 500$	1
$600 < \varepsilon \leq 650$	1
$650 < \varepsilon \leq 700$	2
$700 < \varepsilon \leq 750$	1

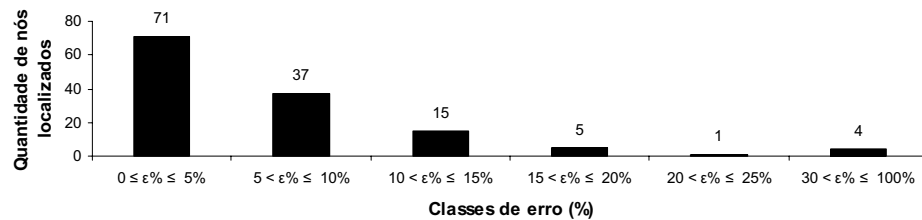


Gráfico 5.17 – Quantidade de nós localizados para cada classe de erro percentual.

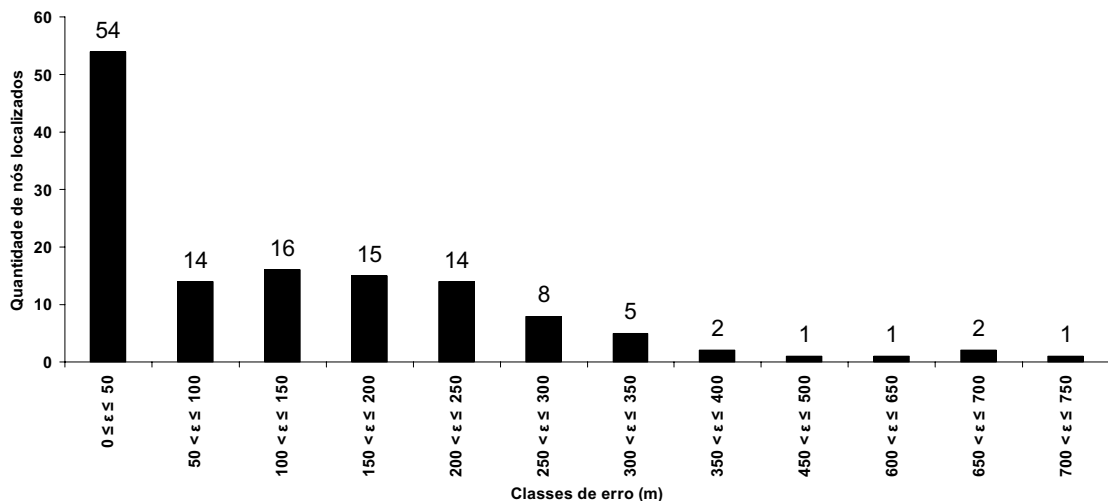


Gráfico 5.18 – Número de nós localizados para cada classe de erro absoluto.

No gráfico 5.19, apresentam-se os 15 primeiros nós do *ranking* dos prováveis nós em falta fornecidos pelo algoritmo, para uma falta ocorrendo no nó 38. Verifica-se que, para este teste, o nó 38 é classificado como a primeira opção do *ranking*, sendo esse nó o local de incidência da falta.

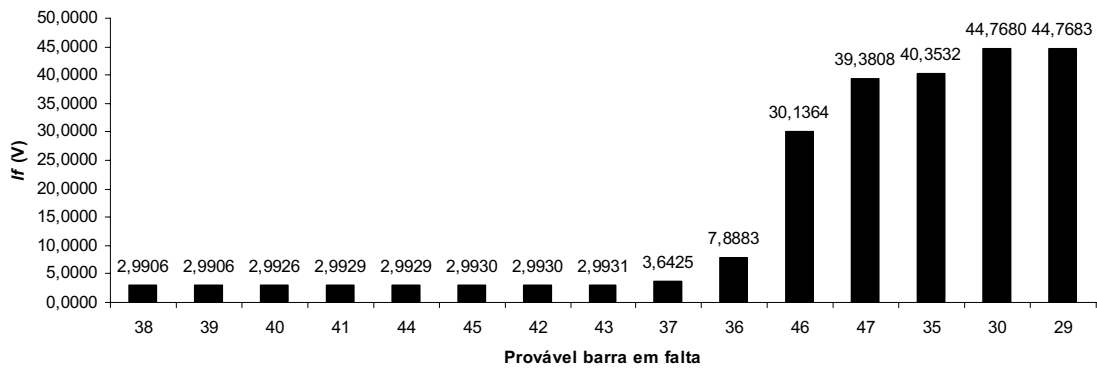


Gráfico 5.19 – *Ranking* dos 15 primeiros nós entre os prováveis nós em falta, para uma falta ocorrendo no nó 38.

Para a falta no nó 68, no gráfico 5.20, apresentam-se os 15 primeiros nós do *ranking* dos prováveis nós em falta. Verifica-se que o nó 68, no qual realmente ocorreu a falta, não é classificado como a primeira opção do *ranking*, e sim o nó 75. Verifica-se, no gráfico 5.20, que os I_f 's para a maioria dos nós encontram-se com valores no intervalo de 5,16 V a 5,18 V, tendo um leve incremento para 6,88 V, para o nó 76, e elevando-se para 20,32 V, para o nó 77. Assim, pode-se assumir que a fronteira da região em falta é o nó 76, pois o próximo nó do *ranking* apresenta um elevado I_f quando comparado com os anteriores. Na figura 5.2, ilustra-se a região em falta no diagrama unifilar do alimentador.

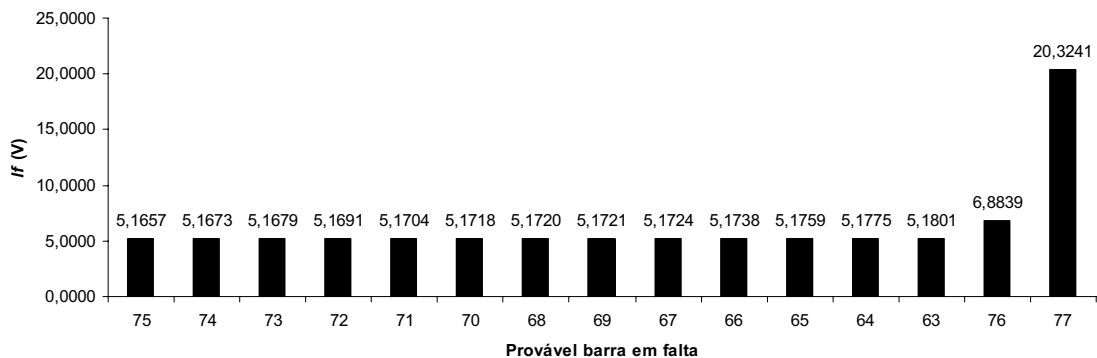


Gráfico 5.20 – *Ranking* dos 15 primeiros nós entre os prováveis nós em falta, para uma falta ocorrendo no nó 68.

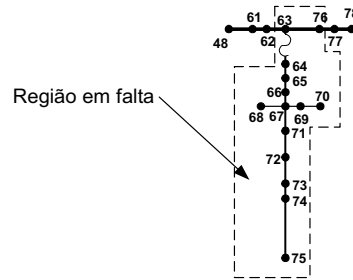


Figura 5.2 – Região em falta indicada pelo algoritmo, para uma falta no nó 68

Teste 15 – As condições de teste são:

Para a simulação das faltas no ATP:

- Resistência de falta igual a 10,0 ohms;
- Transformadores com carregamento de 25% da carga nominal;
- Cargas modeladas como impedâncias constantes.

Para a localização das faltas:

- Transformadores com carregamento estimado de acordo com a subseção 3.4 e $\beta_i = 1,0$;
- Modelo combinado de carga, equação (2.27), com $\alpha = 33,0$; $\beta = 34,0$ e $\delta = 33,0$.

Nas tabelas 5.24 e 5.25 e nos gráficos 5.21 e 5.22, apresentam-se os resultados para o teste 15.

Tabela 5.24 – Quantidade de nós localizados para cada classe de erro percentual.

Faixas para o erro percentual na distância	Quantidade de nós localizados
$0 \leq \varepsilon\% \leq 5\%$	78
$5 < \varepsilon\% \leq 10\%$	31
$10 < \varepsilon\% \leq 15\%$	15
$15 < \varepsilon\% \leq 20\%$	4
$20 < \varepsilon\% \leq 25\%$	1

Tabela 5.25 – Quantidade de nós localizados para cada classe de erro na distância.

Faixas para o erro na distância (m)	Quantidade de nós localizados
$0 \leq \varepsilon \leq 50$	62
$50 < \varepsilon \leq 100$	14
$100 < \varepsilon \leq 150$	13
$150 < \varepsilon \leq 200$	13
$200 < \varepsilon \leq 250$	13
$250 < \varepsilon \leq 300$	7
$300 < \varepsilon \leq 350$	4
$350 < \varepsilon \leq 400$	2
$450 < \varepsilon \leq 500$	1
$600 < \varepsilon \leq 650$	1
$650 < \varepsilon \leq 700$	2
$700 < \varepsilon \leq 750$	1

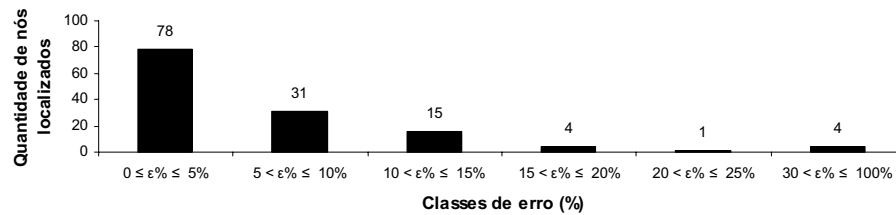


Gráfico 5.21 – Quantidade de nós localizados para cada classe de erro percentual.

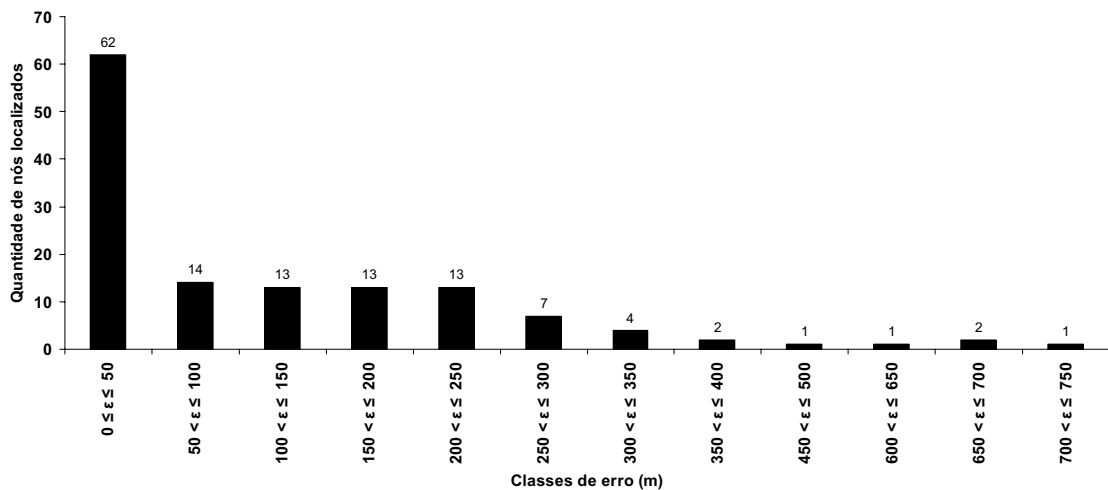


Gráfico 5.22 – Número de nós localizados para cada classe de erro absoluto.

No gráfico 5.23, apresentam-se os 15 primeiros nós do *ranking* dos prováveis nós em falta, fornecidos pelo algoritmo para uma falta no nó 112. Verifica-se que o nó 112 é classificado como a primeira opção do *ranking*, sendo este o local de incidência da falta.

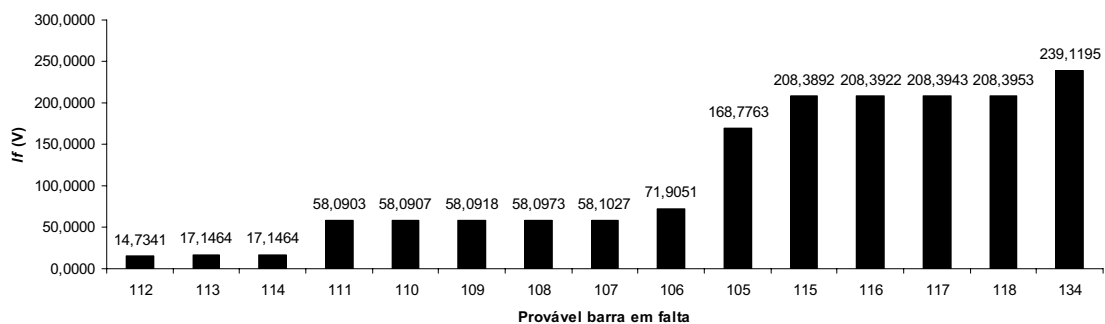


Gráfico 5.23 – *Ranking* dos 15 primeiros nós entre os prováveis nós em falta, para uma falta ocorrendo no nó 112.

No gráfico 5.24, apresentam-se os 15 primeiros nós do *ranking* dos prováveis nós em falta, fornecidos pelo algoritmo para uma falta no nó 12. Verifica-se que, para este teste, o nó 12, em que realmente ocorreu a falta, não é classificado como a primeira opção do *ranking*, e sim o nó 14. Verifica-se, no gráfico 5.24, que os I_f 's para os quatro primeiros nós do *ranking* encontram-se com valores em torno de 4,26 V, aumentando para 28,32 V, para o quinto nó do *ranking*, e para mais de 102,0 V, a partir do oitavo nó do *ranking*. Assim, pode-se assumir que a fronteira da região em falta é o nó 11, pois o próximo nó do *ranking* apresenta um elevado valor para o I_f quando comparado com os anteriores. Na figura 5.3, ilustra-se a região em falta no diagrama unifilar do alimentador.

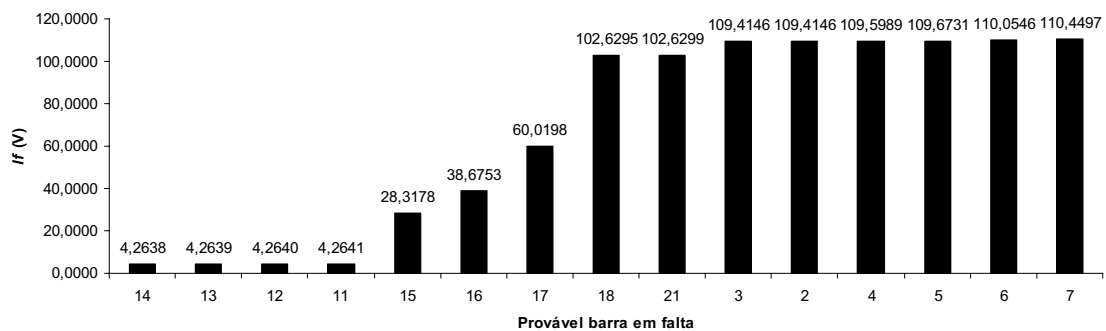


Gráfico 5.24 – *Ranking* dos 15 primeiros nós entre os prováveis nós em falta, para uma falta ocorrendo no nó 12.

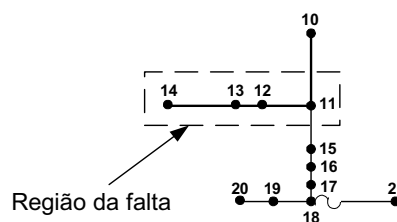


Figura 5.3 – Região em falta indicada pelo algoritmo, para uma falta no nó 12.

Teste 16 – As condições de teste são:

Para a simulação das faltas:

- Resistência de falta igual a 5,0 ohms;
- Transformadores com carregamento de 50% da carga nominal;
- Cargas modeladas como impedâncias constantes.

Para a localização das faltas:

- Transformadores com carregamento estimado de acordo com a subseção 3.4 e $\beta_i = 1,0$;

- Modelo combinado de carga, equação (2.27), com $\alpha = 33,0$; $\beta = 34,0$ e $\delta = 33,0$.

Nas tabelas 5.26 e 5.27 e nos gráficos 5.25 e 5.26, apresentam-se os resultados para o teste 16.

Tabela 5.26 – Quantidade de nós localizados para cada classe de erro percentual.

Faixas para o erro percentual na distância	Quantidade de nós localizados
$0 \leq \varepsilon\% \leq 5\%$	77
$5 < \varepsilon\% \leq 10\%$	36
$10 < \varepsilon\% \leq 15\%$	12
$15 < \varepsilon\% \leq 20\%$	3
$20 < \varepsilon\% \leq 25\%$	1
$30 < \varepsilon\% \leq 100\%$	4

Tabela 5.27 – Quantidade de nós localizados para cada classe de erro na distância.

Faixas para o erro na distância (m)	Quantidade de nós localizados
$0 \leq \varepsilon \leq 50$	52
$50 < \varepsilon \leq 100$	23
$100 < \varepsilon \leq 150$	16
$150 < \varepsilon \leq 200$	18
$200 < \varepsilon \leq 250$	9
$250 < \varepsilon \leq 300$	5
$300 < \varepsilon \leq 350$	4
$350 < \varepsilon \leq 400$	1
$450 < \varepsilon \leq 500$	1
$600 < \varepsilon \leq 650$	1
$650 < \varepsilon \leq 700$	2
$700 < \varepsilon \leq 750$	1

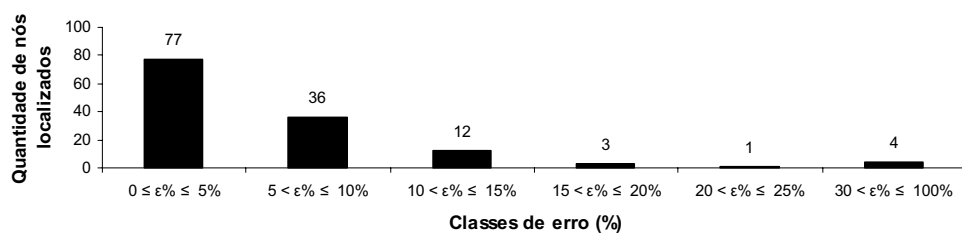


Gráfico 5.25 – Quantidade de nós localizados para cada classe de erro percentual.

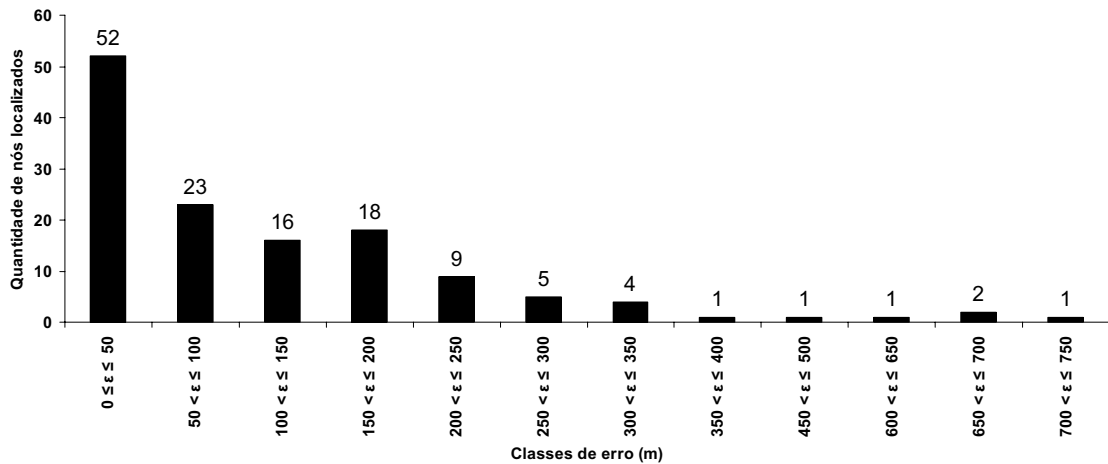


Gráfico 5.26 – Número de nós localizados para cada classe de erro absoluto.

No gráfico 5.27, apresentam-se os 15 primeiros nós do *ranking* dos prováveis nós em falta, para uma falta ocorrendo no nó 93. O nó 93, o local de incidência da falta, é classificado como a primeira opção do *ranking*.

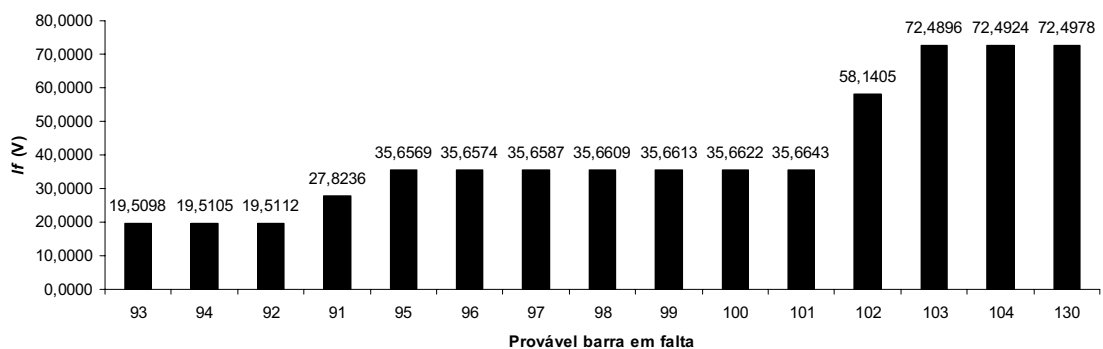


Gráfico 5.27 – *Ranking* dos 15 primeiros nós entre os prováveis nós em falta, para uma falta ocorrendo no nó 93.

No gráfico 5.28, apresentam-se os 15 primeiros nós do *ranking* dos prováveis nós em falta, fornecidos pelo algoritmo proposto, para uma falta ocorrendo no nó 11. Verifica-se que, para este teste, o algoritmo não classifica como primeira opção do *ranking* o nó 11, no qual realmente ocorreu a falta, e sim o nó 14. Verifica-se, no gráfico 5.28, que os *If*'s para os quatro primeiros nós do *ranking* encontram-se com valores em torno de 22,41 V, aumentando para 32,24 V, no quinto nó do *ranking*, e para mais de 148,0 V, a partir do oitavo nó do *ranking*. Assim, pode-se assumir que a fronteira da região em falta é o nó 11, pois o próximo

nó do *ranking* apresenta um elevado *lf* quando comparado com os anteriores. Na figura 5.4, ilustra-se a região em falta no diagrama unifilar do alimentador.

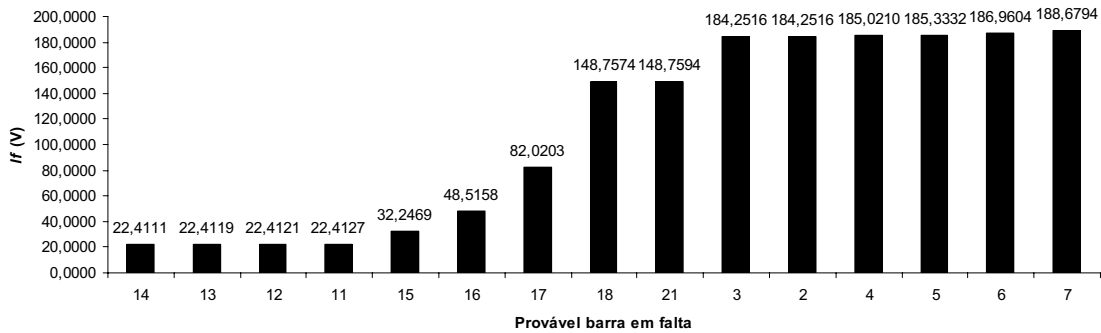


Gráfico 5.28 – *Ranking* dos 15 primeiros nós entre os prováveis nós em falta, para uma falta ocorrendo no nó 1.

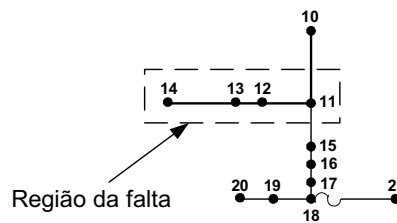


Figura 5.4 – Região em falta indicada pelo algoritmo, para uma falta no nó 11.

Teste 17 – As condições de teste são:

Para a simulação das faltas:

- Resistência de falta igual a 10,0 ohms;
- Transformadores com carregamento de 50% da carga nominal;
- Cargas modeladas como impedâncias constantes.

Para a localização das faltas:

- Transformadores com carregamento estimado de acordo com a subseção 3.4 e $\beta_i = 1,0$;
- Modelo combinado de carga, equação (2.27), com $\alpha = 33,0$; $\beta = 34,0$ e $\delta = 33,0$.

Nas tabelas 5.28 e 5.29 e nos gráficos 5.29 e 5.30, apresentam-se os resultados para o teste 17.

Tabela 5.28 – Quantidade de nós localizados para cada classe de erro percentual.

Faixas para o erro percentual na distância	Quantidade de nós localizados
$0 \leq \varepsilon\% \leq 5\%$	81
$5 < \varepsilon\% \leq 10\%$	31
$10 < \varepsilon\% \leq 15\%$	12
$15 < \varepsilon\% \leq 20\%$	4
$20 < \varepsilon\% \leq 25\%$	1
$30 < \varepsilon\% \leq 100\%$	4

Tabela 5.29 – Quantidade de nós localizados para cada classe de erro na distância.

Faixas para o erro na distância (m)	Quantidade de nós localizados
$0 \leq \varepsilon \leq 50$	54
$50 < \varepsilon \leq 100$	24
$100 < \varepsilon \leq 150$	14
$150 < \varepsilon \leq 200$	16
$200 < \varepsilon \leq 250$	9
$250 < \varepsilon \leq 300$	5
$300 < \varepsilon \leq 350$	5
$350 < \varepsilon \leq 400$	1
$450 < \varepsilon \leq 500$	1
$600 < \varepsilon \leq 650$	1
$650 < \varepsilon \leq 700$	2
$700 < \varepsilon \leq 750$	1

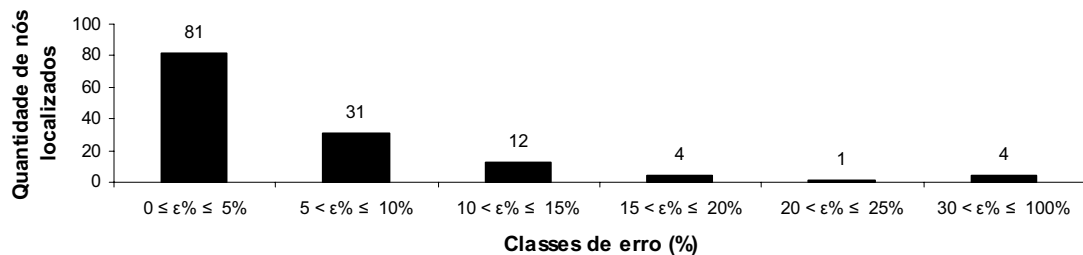


Gráfico 5.29 – Quantidade de nós localizados para cada classe de erro percentual.

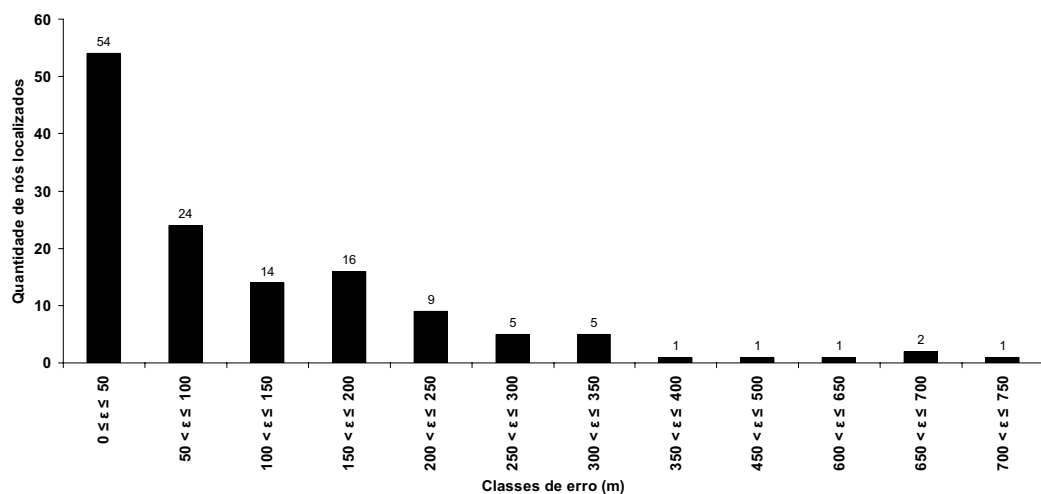


Gráfico 5.30 – Número de nós localizados para cada classe de erro absoluto.

No gráfico 5.31, apresentam-se os 15 primeiros nós do *ranking* dos prováveis nós em falta, para uma falta ocorrendo no nó 88. Verifica-se que, para este teste, o nó 88 é classificado como a primeira opção do *ranking*.

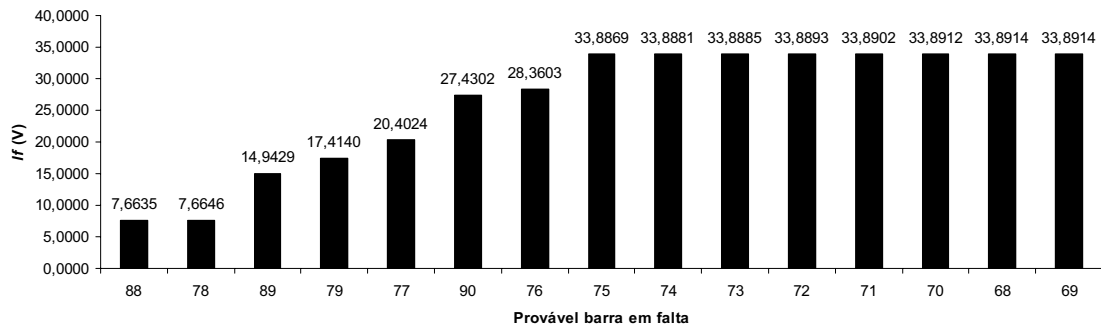


Gráfico 5.31 – *Ranking* dos 15 primeiros nós entre os prováveis nós em falta, para uma falta ocorrendo no nó 88.

No gráfico 5.32, apresentam-se os 15 primeiros nós do *ranking* dos prováveis nós em falta, para uma falta ocorrendo no nó 102. Verifica-se que o nó 102 não é classificado como a primeira opção do *ranking*, e sim o nó 134. Verifica-se, no gráfico 5.32, que o *If* para os sete primeiros nós do *ranking* encontram-se entre 9,27 V e 9,29 V, aumentando para 14,40 V, no oitavo nó do *ranking*, e para mais de 29,0 V, a partir do nono nó do *ranking*. Assim, pode-se assumir que a fronteira da região em falta é o nó 102, pois o próximo nó do *ranking* apresenta um *If* maior que duas vezes o *If* do nó 102. Na figura 5.5, ilustra-se a região em falta no diagrama unifilar do alimentador.

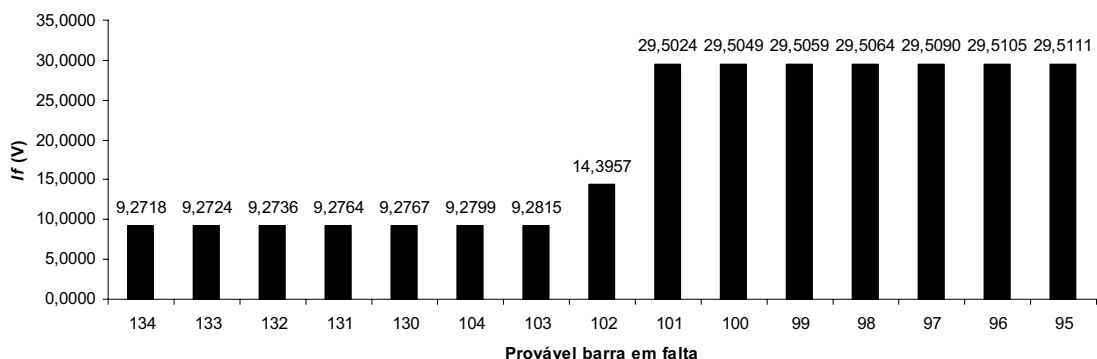


Gráfico 5.32 – *Ranking* dos 15 primeiros nós entre os prováveis nós em falta, para uma falta ocorrendo no nó 102.

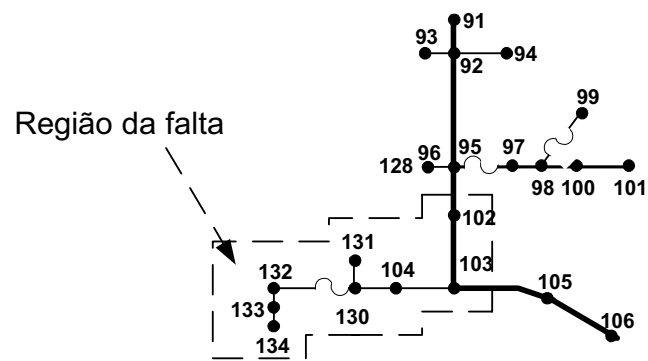


Figura 5.5 – Região em falta indicada pelo algoritmo, para uma falta no nó 102.

Teste 18 – As condições de teste são:

Para a simulação das faltas:

- Resistência de falta igual a 5,0 ohms;
- Transformadores com carregamento de 75% da carga nominal;
- Cargas modeladas como impedâncias constantes.

Para a localização das faltas:

- Transformadores com carregamento estimado de acordo com a subseção 3.4 e $\beta_i = 1,0$;
- Modelo combinado de cargas, equação (2.27), com $\alpha = 33,0$; $\beta = 34,0$ e $\delta = 33,0$.

Nas tabelas 5.30 e 5.31 e nos gráficos 5.33 e 5.34, apresentam-se os resultados para o teste 18.

Tabela 5.30 – Quantidade de nós localizados para cada classe de erro percentual.

Faixas para o erro percentual na distância	Quantidade de nós localizados
$0 \leq \varepsilon\% \leq 5\%$	77
$5 < \varepsilon\% \leq 10\%$	36
$10 < \varepsilon\% \leq 15\%$	11
$15 < \varepsilon\% \leq 20\%$	3
$20 < \varepsilon\% \leq 25\%$	1
$25 < \varepsilon\% \leq 30\%$	1
$30 < \varepsilon\% \leq 100\%$	4

Tabela 5.31 – Quantidade de nós localizados para cada classe de erro na distância.

Faixas para o erro na distância (m)	Quantidade de nós localizados
$0 \leq \varepsilon \leq 50$	49
$50 < \varepsilon \leq 100$	26
$100 < \varepsilon \leq 150$	16
$150 < \varepsilon \leq 200$	17
$200 < \varepsilon \leq 250$	10
$250 < \varepsilon \leq 300$	4
$300 < \varepsilon \leq 350$	4
$350 < \varepsilon \leq 400$	1
$450 < \varepsilon \leq 500$	2
$600 < \varepsilon \leq 650$	1
$650 < \varepsilon \leq 700$	2
$700 < \varepsilon \leq 750$	1

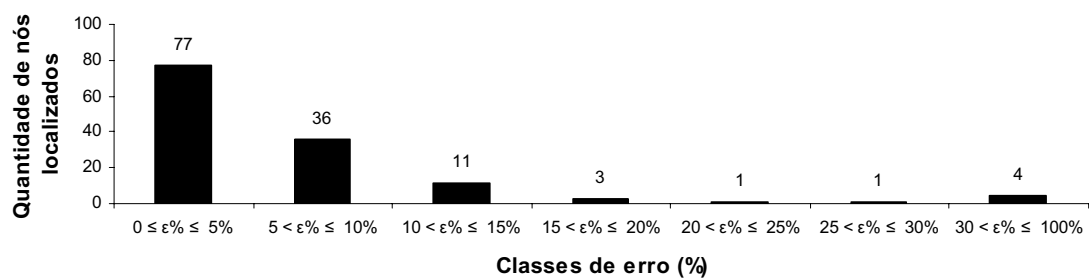


Gráfico 5.33 – Quantidade de nós localizados para cada classe de erro percentual.

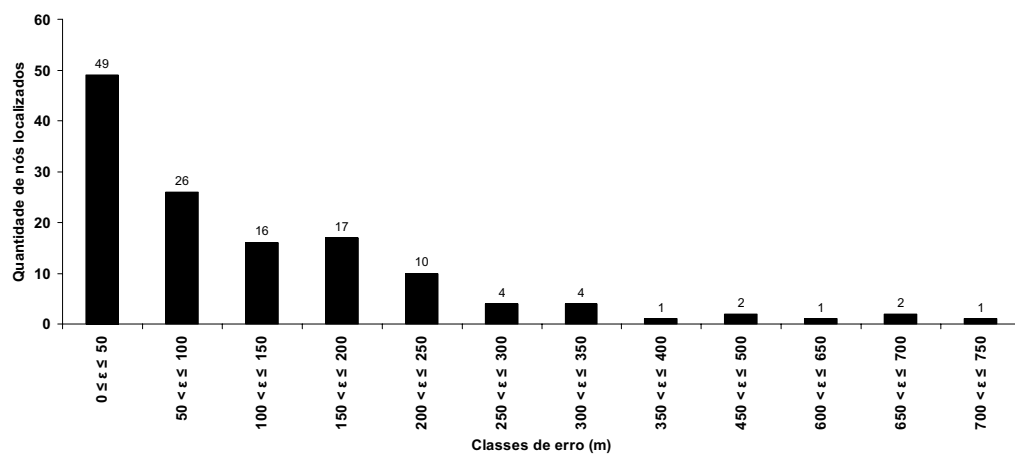


Gráfico 5.34 – Número de nós localizados para cada classe de erro absoluto.

No gráfico 5.35, apresentam-se os 15 primeiros nós do *ranking* dos prováveis nós em falta, para uma falta ocorrendo no nó 23. Verifica-se que, para este teste, o nó 23 é classificado como a primeira opção do *ranking*.

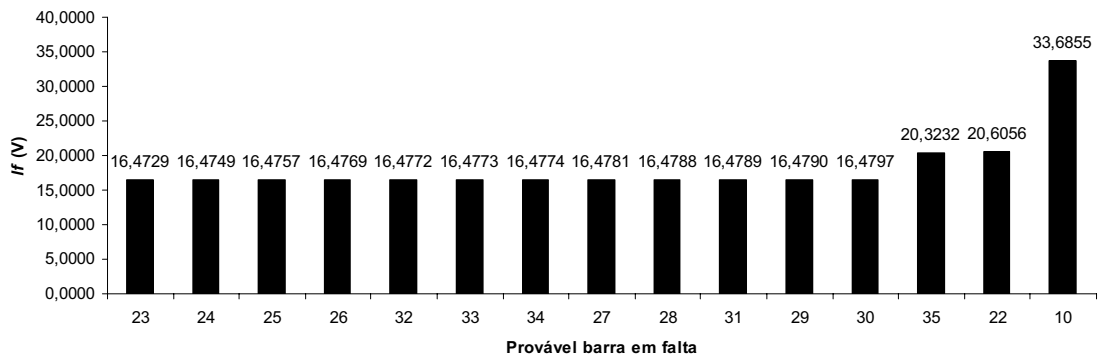


Gráfico 5.35 – *Ranking* dos 15 primeiros nós entre os prováveis nós em falta, para uma falta ocorrendo no nó 23.

No gráfico 5.36, apresentam-se os 15 primeiros nós do *ranking* dos prováveis nós em falta, para uma falta ocorrendo no nó 29. Verifica-se que o algoritmo classifica como a primeira opção do *ranking* o nó 23. Verifica-se, no gráfico 5.36, que o I_f para os doze primeiros nós do *ranking* encontram-se entre 16,41 V e 16,42 V, aumentando para 20,47 V, no décimo terceiro nó, para 21,77 V, no décimo quarto nó do *ranking*, e para mais de 35,0 V, a partir do décimo quinto nó do *ranking*. Assim, pode-se assumir que a fronteira da região em falta é o nó 22, pois o próximo nó do *ranking* apresenta um I_f maior que o I_f do nó 22. Na figura 5.6, ilustra-se a região em falta no diagrama unifilar do alimentador.

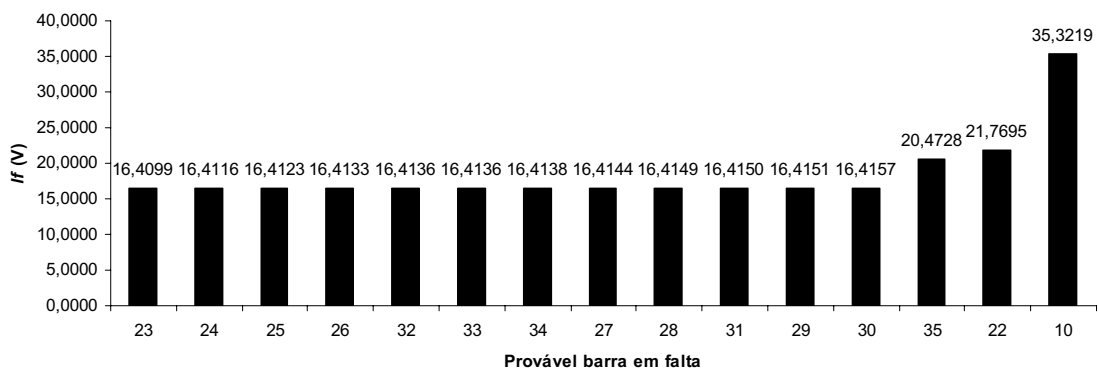


Gráfico 5.36 – *Ranking* dos 15 primeiros nós entre os prováveis nós em falta, para uma falta ocorrendo no nó 29.

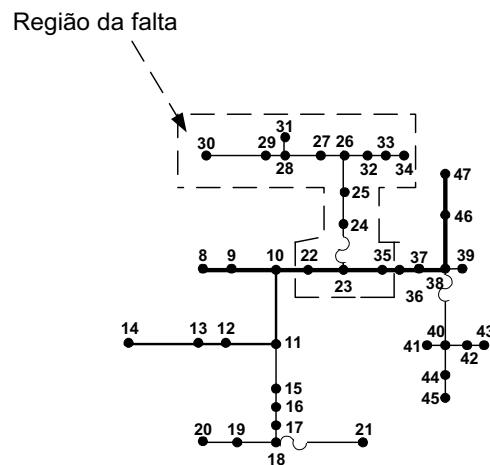


Figura 5.6 – Região em falta indicada pelo algoritmo, para uma falta no nó 29.

Teste 19 – As condições de teste são:

Para a simulação das faltas:

- Resistência de falta igual a 10,0 ohms;
- Transformadores com carregamento de 75% da carga nominal;
- Cargas modeladas como impedâncias constantes.

Para a localização das faltas:

- Transformadores com carregamento estimado de acordo com a subseção 3.4 e $\beta_i = 1,0$;
- Modelo combinado de carga, equação (2.27), com $\alpha = 33,0$; $\beta = 34,0$ e $\delta = 33,0$.

Nas tabelas 5.32 e 5.33 e nos gráficos 5.37 e 5.38, apresentam-se os resultados para o teste 19.

Tabela 5.32 – Quantidade de nós localizados para cada classe de erro percentual.

Faixas para o erro percentual na distância	Quantidade de nós localizados
$0 \leq \varepsilon\% \leq 5\%$	76
$5 < \varepsilon\% \leq 10\%$	37
$10 < \varepsilon\% \leq 15\%$	12
$15 < \varepsilon\% \leq 20\%$	3
$20 < \varepsilon\% \leq 25\%$	1
$30 < \varepsilon\% \leq 100\%$	4

Tabela 5.33 – Quantidade de nós localizados para cada classe de erro na distância.

$0 < \varepsilon \leq 50$	51
$50 < \varepsilon \leq 100$	24
$100 < \varepsilon \leq 150$	15
$150 < \varepsilon \leq 200$	18
$200 < \varepsilon \leq 250$	10
$250 < \varepsilon \leq 300$	5
$300 < \varepsilon \leq 350$	4
$350 < \varepsilon \leq 400$	1
$450 < \varepsilon \leq 500$	1
$600 < \varepsilon \leq 650$	1
$650 < \varepsilon \leq 700$	2
$700 < \varepsilon \leq 750$	1

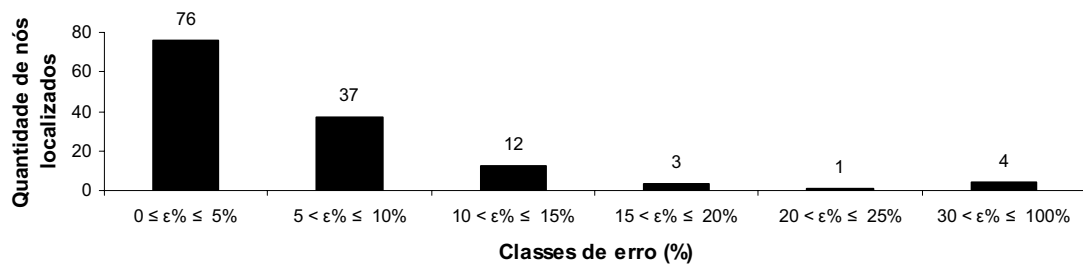


Gráfico 5.37 – Quantidade de nós localizados para cada classe de erro percentual.

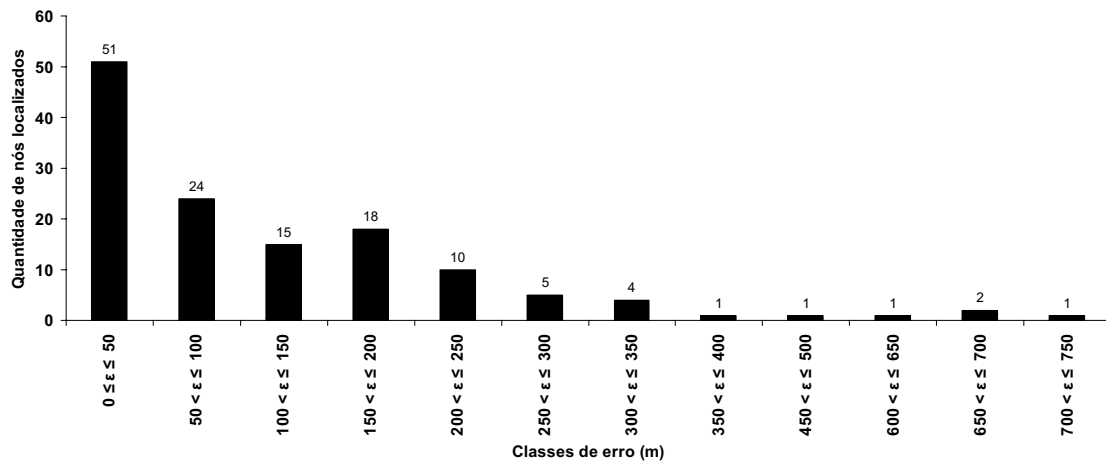


Gráfico 5.38 – Número de nós localizados para cada classe de erro absoluto.

No gráfico 5.39, apresentam-se os 15 primeiros nós do *ranking* dos prováveis nós em falta, para uma falta ocorrendo no nó 121. O nó 121, o verdadeiro local de incidência da falta, é classificado como a primeira opção do *ranking*.

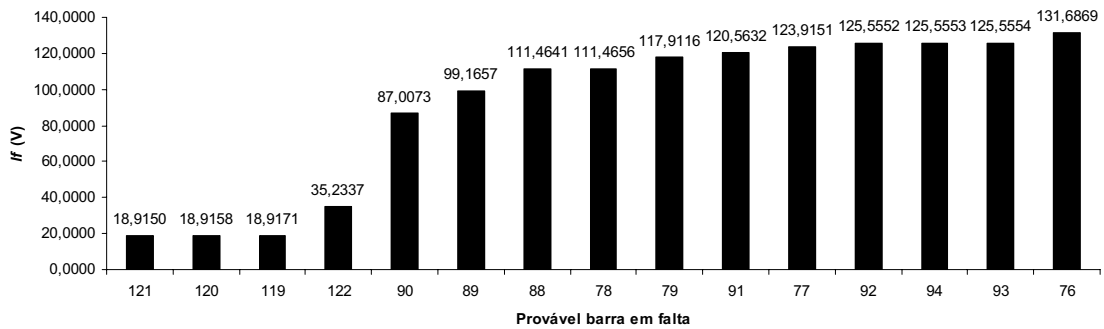


Gráfico 5.39 – *Ranking* dos 15 primeiros nós entre os prováveis nós em falta, para uma falta ocorrendo no nó 121.

O gráfico 5.40 apresenta os 15 primeiros nós do *ranking* dos prováveis nós em falta, para uma falta ocorrendo no nó 31. Para este teste, o nó 23 é classificado como a primeira opção do *ranking*. Verifica-se, no gráfico 5.40, que os *lf*'s para os doze primeiros nós do *ranking* encontram-se com valores em torno de 6,365 V, aumentando para 8,799 V, no décimo terceiro nó, para 15,172 V, no décimo quarto nó do *ranking*, e para mais de 23,0 V, a partir do décimo quinto nó do *ranking*. Assim, pode-se assumir que a fronteira da região em falta é o nó 35, pois o próximo nó do *ranking* apresenta um *lf* quase duas vezes maior que o *lf* do nó 35. Na figura 5.7, ilustra-se a região em falta no diagrama unifilar do alimentador.

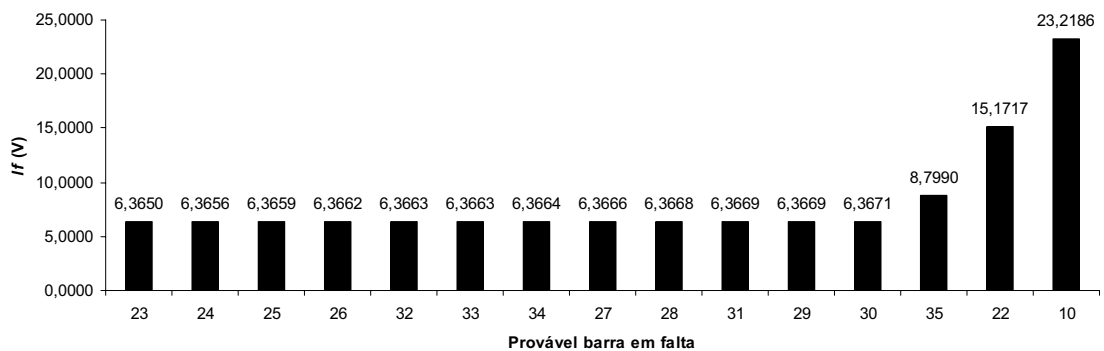


Gráfico 5.40 – *Ranking* dos 15 primeiros nós entre os prováveis nós em falta, para uma falta ocorrendo no nó 31.

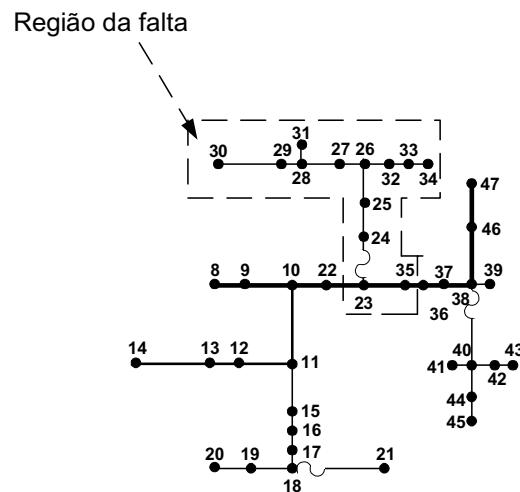


Figura 5.7 – Região em falta indicada pelo algoritmo, para uma falta no nó 31.

Teste 20 – As condições de teste são:

Para a simulação das faltas:

- Resistência de falta igual a 5,0 ohms;
- Transformadores com carregamento de 100% (carga nominal);
- Cargas modeladas como impedâncias constantes.

Para a localização das faltas:

- Transformadores com carregamento estimado de acordo com a subseção 3.4 e $\beta_i = 1,0$;
- Modelo combinado de carga, equação (2.27), com $\alpha = 33,0$; $\beta = 34,0$ e $\delta = 33,0$.

Nas tabelas 5.34 e 5.35 e nos gráficos 5.41 e 5.44, apresentam-se os resultados para o teste 20.

Tabela 5.34 – Quantidade de nós localizados para cada classe de erro percentual.

Faixas para o erro percentual na distância	Quantidade de nós localizados
$0 \leq \varepsilon\% \leq 5\%$	68
$5 < \varepsilon\% \leq 10\%$	36
$10 < \varepsilon\% \leq 15\%$	20
$15 < \varepsilon\% \leq 20\%$	3
$20 < \varepsilon\% \leq 25\%$	1
$30 < \varepsilon\% \leq 100\%$	5

Tabela 5.35 – Quantidade de nós localizados para cada classe de erro na distância.

Faixas para o erro na distância (m)	Quantidade de nós localizados
$0 \leq \varepsilon \leq 50$	41
$50 < \varepsilon \leq 100$	25
$100 < \varepsilon \leq 150$	13
$150 < \varepsilon \leq 200$	17
$200 < \varepsilon \leq 250$	10
$250 < \varepsilon \leq 300$	11
$300 < \varepsilon \leq 350$	6
$350 < \varepsilon \leq 400$	3
$400 < \varepsilon \leq 450$	1
$450 < \varepsilon \leq 500$	1
$600 < \varepsilon \leq 650$	1
$650 < \varepsilon \leq 700$	2
$700 < \varepsilon \leq 750$	1
$750 < \varepsilon \leq 800$	1

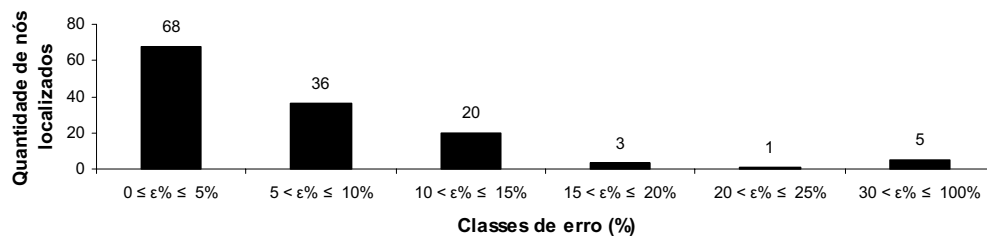


Gráfico 5.41 – Quantidade de nós localizados para cada classe de erro percentual.

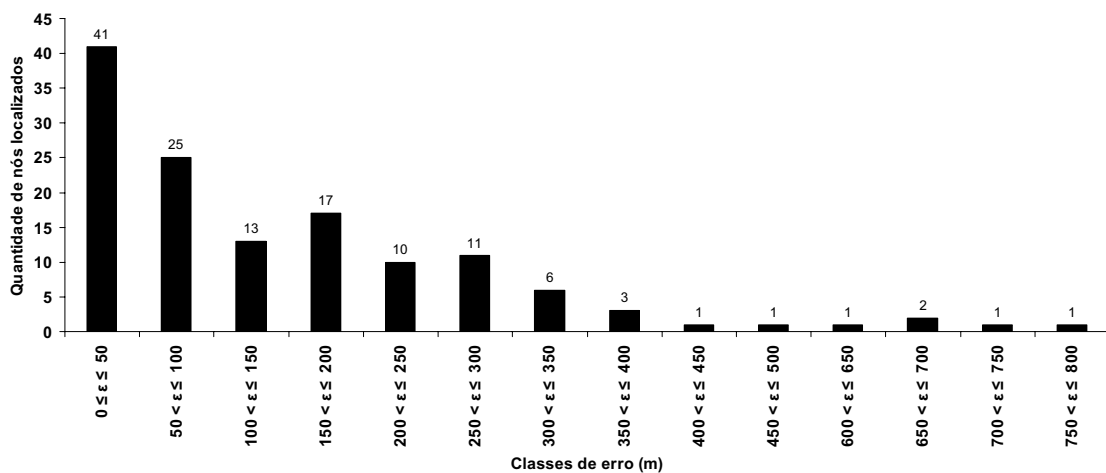


Gráfico 5.42 – Número de nós localizados para cada classe de erro absoluto.

No gráfico 5.43, apresentam-se os 15 primeiros nós do *ranking* dos prováveis nós em falta, para uma falta ocorrendo no nó 134. Verifica-se que o nó 134 é classificado como a primeira opção do *ranking*.

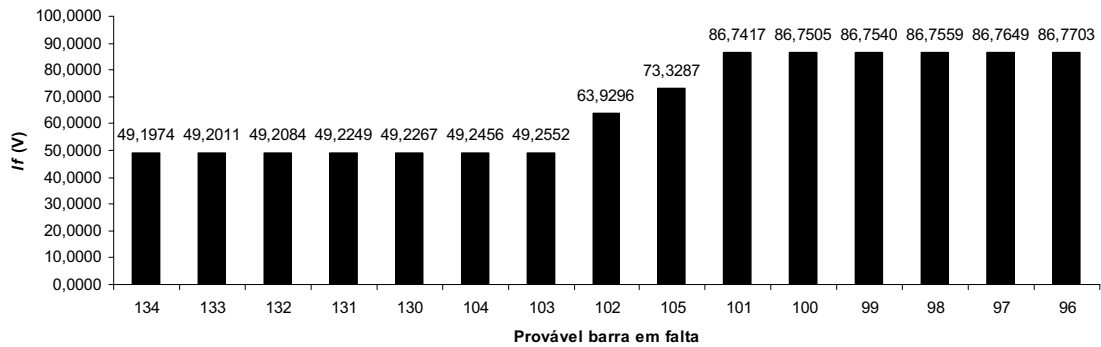


Gráfico 5.43 – *Ranking* dos 15 primeiros nós entre os prováveis nós em falta, para uma falta ocorrendo no nó 134.

No gráfico 5.44, apresentam-se os 15 primeiros nós do *ranking* dos prováveis nós em falta, para uma falta ocorrendo no nó 92. O nó 101 é classificado como a primeira opção do *ranking*. Verifica-se, no gráfico 5.44, que os *lf*s para os sete primeiros nós do *ranking* encontram-se com valores entre 30,67 V e 30,69 V, aumentando para 36,03 V, do oitavo ao nono nó, e para mais de 43,0 V, do décimo ao décimo quinto nós do *ranking*. Neste caso, existe uma variação de, aproximadamente, 6,0 V entre o *lf* do nó 95 para o *lf* do nó 93, uma variação de, aproximadamente, 7,00 V entre o *lf* do nó 92 para o *lf* do nó 91 e uma variação de, aproximadamente, 12,00 V entre o *lf* do nó 102 para o *lf* do nó 103. Assim, podem-se definir quatro regiões de falta para os quinze nós mostrados na figura 5.8. Porém, todas elas são vizinhas e, desta forma, o direcionamento das equipes de manutenção não seria prejudicado. Na figura 5.8, ilustram-se as regiões em falta no diagrama unifilar do alimentador.

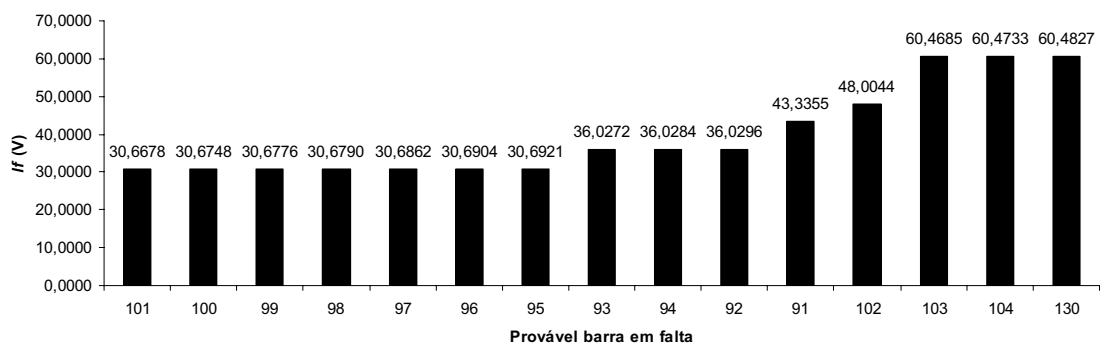


Gráfico 5.44 – *Ranking* dos 15 primeiros nós entre os prováveis nós em falta, para uma falta ocorrendo no nó 92.

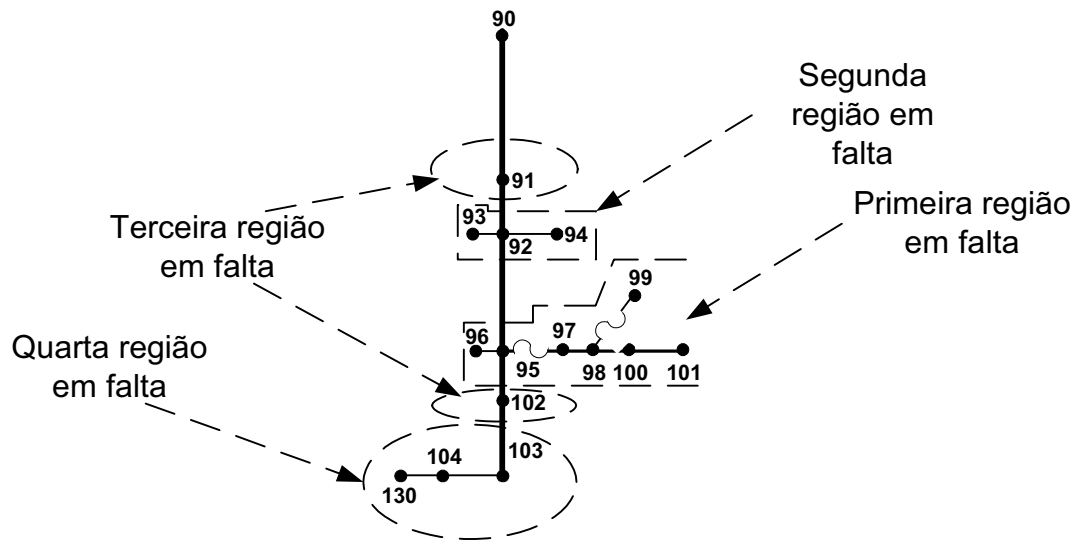


Figura 5.8 – Regiões em falta indicadas pelo algoritmo, para uma falta no nó 92.

Analisando a figura 5.8, pode-se concluir que a falta estará na primeira, segunda ou terceira região, pois a terceira região em falta contém dois nós, sendo um deles vizinho da primeira região em falta e o outro vizinho da segunda região em falta, delimitando, assim, uma área com elevada probabilidade de incidência da falta.

Teste 21 – As condições de teste são:

Para a simulação das faltas:

- Resistência de falta igual a 10,0 ohms;
- Transformadores com carregamento de 100% (carga nominal);
- Cargas modeladas como impedâncias constantes.

Para a localização das faltas:

- Transformadores com carregamento estimado de acordo com a subseção 3.4 e $\beta_i = 1,0$;
- Modelo combinado de carga, equação (2.27), com $\alpha = 33,0$; $\beta = 34,0$ e $\delta = 33,0$.

Nas tabelas 5.36 e 5.37 e nos gráficos 5.45 e 5.46, apresentam-se os resultados para o teste 21.

Tabela 5.36 – Quantidade de nós localizados para cada classe de erro percentual.

Faixas para o erro percentual na distância	Quantidade de nós localizados
$0 \leq \varepsilon\% \leq 5\%$	73
$5 < \varepsilon\% \leq 10\%$	37
$10 < \varepsilon\% \leq 15\%$	14
$15 < \varepsilon\% \leq 20\%$	3
$20 < \varepsilon\% \leq 25\%$	1
$25 < \varepsilon\% \leq 30\%$	1
$30 < \varepsilon\% \leq 100\%$	4

Tabela 5.37 – Quantidade de nós localizados para cada classe de erro na distância.

Faixas para o erro na distância (m)	Quantidade de nós localizados
$0 \leq \varepsilon \leq 50$	44
$50 < \varepsilon \leq 100$	26
$100 < \varepsilon \leq 150$	17
$150 < \varepsilon \leq 200$	17
$200 < \varepsilon \leq 250$	10
$250 < \varepsilon \leq 300$	5
$300 < \varepsilon \leq 350$	6
$350 < \varepsilon \leq 400$	2
$450 < \varepsilon \leq 500$	2
$600 < \varepsilon \leq 650$	1
$650 < \varepsilon \leq 700$	2
$700 < \varepsilon \leq 750$	1

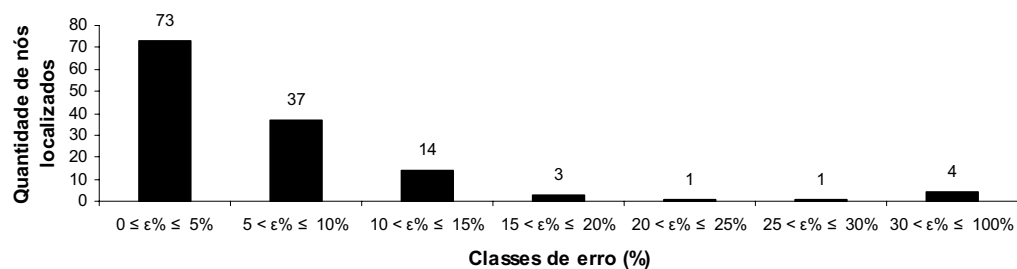


Gráfico 5.45 – Quantidade de nós localizados para cada classe de erro percentual.

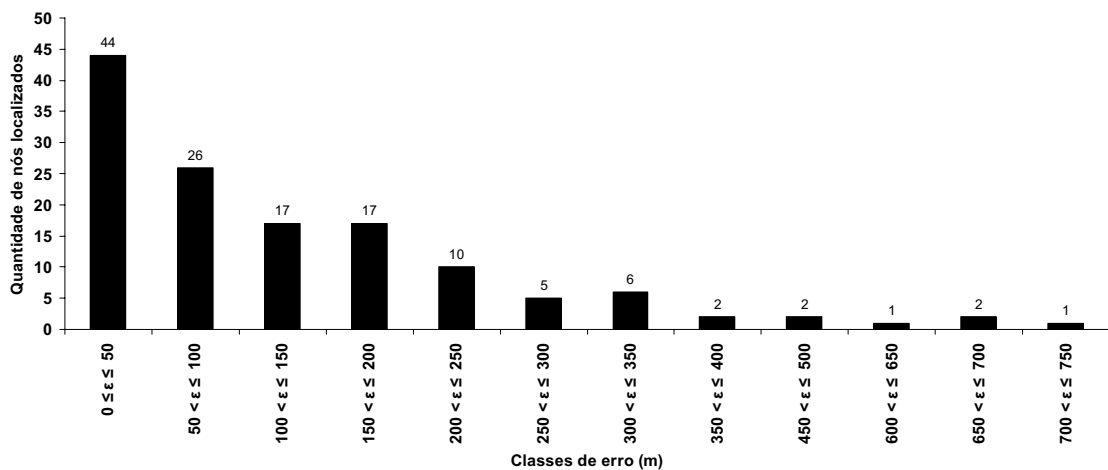


Gráfico 5.46 – Número de nós localizados para cada classe de erro absoluto.

No gráfico 5.47, apresentam-se os 15 primeiros nós do *ranking* dos prováveis nós em falta, para uma falta ocorrendo no nó 87. O nó 87 é classificado como a primeira opção do *ranking*.

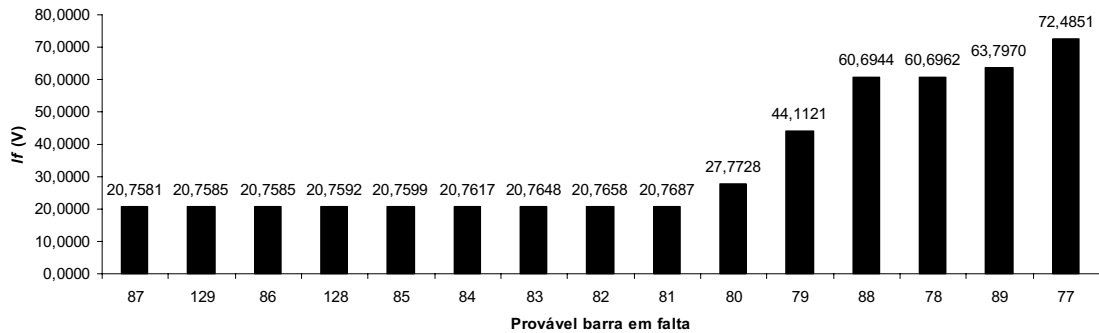


Gráfico 5.47 – *Ranking* dos 15 primeiros nós entre os prováveis nós em falta, para uma falta ocorrendo no nó 87.

No gráfico 5.48, apresentam-se os 15 primeiros nós do *ranking* dos prováveis nós em falta, para uma falta ocorrendo no nó 14. O nó 15 é classificado como a primeira opção do *ranking*. Verifica-se, no gráfico 5.48, que o *lf* para o primeiro nó do *ranking* é 11,32 V, aumentando para a faixa de 20,37 V a 20,87 V, do segundo ao sexto nó do *ranking*, e para 39,03 V, para o sétimo nó do *ranking*. Assim, pode-se assumir que a fronteira da região em falta é o nó 11, pois o próximo nó do *ranking* apresenta um *lf* quase duas vezes maior que o *lf* do nó 11. Na figura 5.9, ilustram-se as regiões em falta no diagrama unifilar do alimentador.

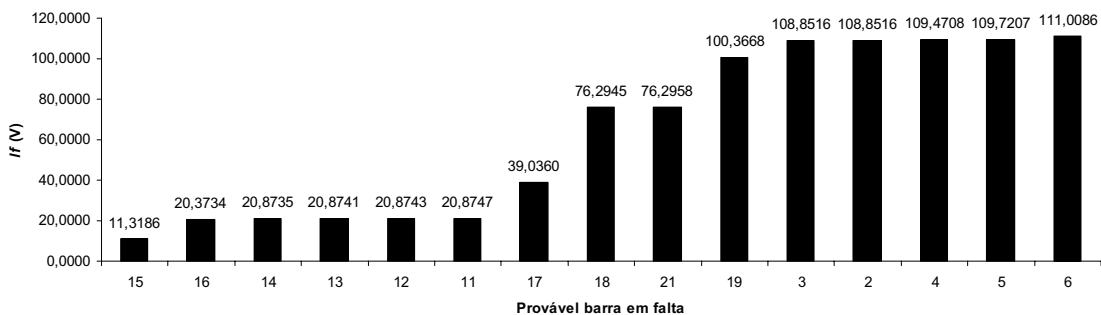


Gráfico 5.48 – *Ranking* dos 15 primeiros nós entre os prováveis nós em falta, para uma falta ocorrendo no nó 14.

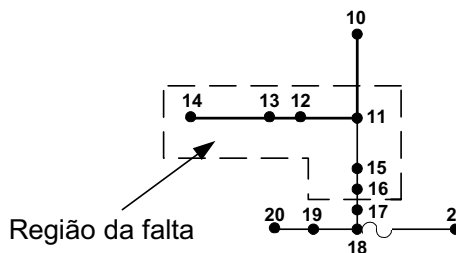


Figura 5.9 – Região em falta indicada pelo algoritmo, para uma falta no nó 14.

As tabelas 5.22 a 5.37 e os gráficos 5.17 a 5.48, testes 14 a 21, confirmam a tendência do algoritmo a apresentar melhor precisão para valores elevados de resistências de faltas, porém fora do contexto de faltas de alta impedância, mesmo quando se utiliza o modelo combinado para as cargas. Deve-se observar, ainda, que o nível de carregamento dos transformadores durante a simulação das faltas e a estimativa no carregamento dos transformadores têm influência pequena na precisão dos resultados obtidos quando o modelo de carga utilizado é diferente daquele empregado na simulação das faltas.

5.3.5 Comentários gerais sobre os testes 1 a 21

Em todos os casos nos quais foram utilizados, no algoritmo de localização de faltas, modelos de cargas diferentes do empregado nas simulações das faltas a serem localizadas, verificou-se que, para valores baixos de resistências de faltas, o algoritmo apresenta problemas de convergência, principalmente quando se utiliza modelo de potência constante. Esse problema está relacionado com o elevado valor que as correntes das cargas podem atingir devido ao fato de o perfil tensão do alimentador ser reduzido quando está fluindo pela rede uma elevada corrente (corrente de falta).

Deve-se levar em consideração que os testes realizados são, em alguns casos, bem rigorosos. Esse problema de convergência pode, na prática, ser contornado através da utilização de alguns casos de faltas reais para se chegar a uma combinação mais adequada de modelos de cargas, a ser utilizada para efeitos de localização da falta.

Com relação à estimativa do carregamento dos transformadores de distribuição instalados no alimentador, verificou-se que isso somente é relevante quando o modelo de carga empregado pelo algoritmo de localização de falta é o mesmo que o modelo de carga empregado nas simulações das faltas a serem localizadas. Quando existem diferenças entre os modelos de cargas adotados, os erros introduzidos nos resultados fornecidos pelo algoritmo de

localização de faltas propostos são, em sua grande maioria, referentes à diferença dos modelos de cargas utilizados.

Para condições não ideais, observando-se a convergência para o algoritmo e variando-se o carregamento utilizado no algoritmo de localização de faltas, para alguns casos, a localização do verdadeiro local da falta não foi exata, porém a região em falta obtida através do algoritmo é confiável, permitindo, assim, que as equipes de manutenção sejam direcionadas para a região correta do alimentador. Para valores mais elevados da resistência de falta, mas fora do contexto de faltas de alta impedância, o desempenho do algoritmo melhora sensivelmente.

5.4 Resultados da alocação otimizada dos medidores

Os testes de 1 a 21 foram executados para verificar o comportamento do algoritmo de localização de faltas proposto, frente à variação do valor da resistência de falta, a erros na estimativa do carregamento dos transformadores e ao uso de diferentes modelos de carga. Para isso, considerou-se que os quatro medidores empregados no processo de localização de faltas foram instalados de forma heurística no alimentador, sendo escolhidos os pontos 20, 81, 115 e 125.

Como discutido no capítulo 4, a quantidade de medidores empregados no processo de localização de faltas, bem como os locais onde esses medidores são instalados no alimentador, influenciam na precisão do algoritmo proposto. Desta forma, com o objetivo de melhorar a precisão dos resultados fornecidos pela técnica de localização de faltas, considerando os mesmos quatro medidores disponíveis para serem instalados na rede, efetuou-se a alocação otimizada dos mesmos utilizando o modelo proposto na subseção 4.1. A alocação otimizada foi realizada considerando as mesmas condições adotadas para o teste 10. Esse teste foi escolhido, pois, entre todos, foi aquele que apresentou maiores erros relacionados com a distância entre o nó inicial do alimentador ao local da falta e do nó inicial do alimentador ao ponto indicado pelo algoritmo de localização de faltas proposto.

Para a execução da alocação otimizada dos medidores de tensão, os seguintes valores para os parâmetros do *AG* foram calibrados através de testes e simulações exaustivas:

Número de medidores disponíveis: 4;

Número de indivíduos da população: 300;

Número máximo de iterações: 200;

Taxa de recombinação inicial: 0,75;

Taxa de mutação inicial: 0,015;

O valor da função de adaptação para a configuração otimizada, após 5 simulações, foi 71.806,00, enquanto o valor da função de adaptação para a configuração utilizada nos testes de 1 a 21 foi 5.281.131,00. Na função objetivo, equação (4.1) foram consideradas 17 classes para o erro na distância, tendo cada uma delas um intervalo de 50 metros. Observa-se que, sendo o AG uma metaheurística, não se pode garantir que essa solução encontrada seja a ótima global. O AG forneceu os nós 5, 61, 111 e 118 para alocação otimizada de medidores no alimentador, como representado na figura 5.10.

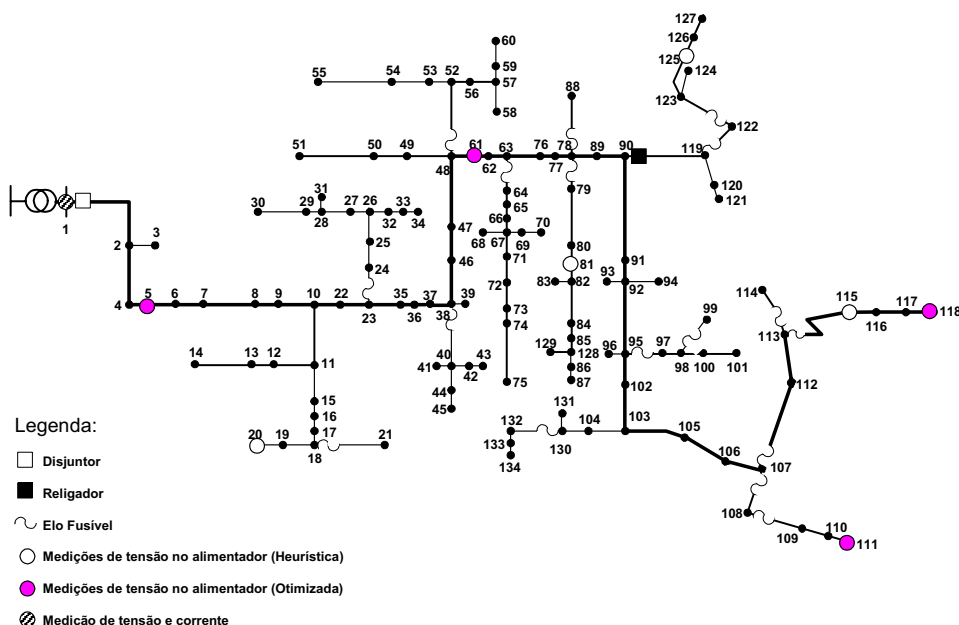


Figura 5.10 – Representação dos pontos para a alocação heurística e para a alocação otimizada dos medidores de tensão no alimentador.

5.4.1 Análise do impacto da alocação otimizada dos medidores de tensão no algoritmo de localização de faltas proposto

Os testes 22 e 23, apresentados a seguir, tem por finalidade verificar as melhorias proporcionadas à técnica de localização de faltas proposta, considerando a alocação otimizada dos medidores de tensão.

Teste 22 – Este foi realizado considerando a localização de faltas que utiliza a configuração obtida através do algoritmo para a alocação otimizada dos medidores de tensão. As considerações para o teste 22 são as mesmas do teste 10, e os resultados estão apresentados nas tabelas 5.38 e 5.39 e nos gráficos 5.49 e 5.50.

Tabela 5.38 – Quantidade de nós localizados para cada classe de erro percentual.

Faixas para o erro percentual na distância	Quantidade de nós localizados	
	Teste 10	Teste 22
$0 \leq \varepsilon\% \leq 5\%$	62	55
$5 < \varepsilon\% \leq 10\%$	29	48
$10 < \varepsilon\% \leq 15\%$	17	23
$15 < \varepsilon\% \leq 20\%$	8	6
$20 < \varepsilon\% \leq 25\%$	0	1
$30 < \varepsilon\% \leq 100\%$	17	0

Tabela 5.39 – Quantidade de nós localizados para cada classe de erro na distância.

Faixas para o erro na distância (m)	Quantidade de nós localizados	
	Teste 10	Teste 22
$0 \leq \varepsilon \leq 50$	26	27
$50 < \varepsilon \leq 100$	28	21
$100 < \varepsilon \leq 150$	15	18
$150 < \varepsilon \leq 200$	16	28
$200 < \varepsilon \leq 250$	9	19
$250 < \varepsilon \leq 300$	7	11
$300 < \varepsilon \leq 350$	4	4
$350 < \varepsilon \leq 400$	4	1
$400 < \varepsilon \leq 450$	5	4
$450 < \varepsilon \leq 500$	2	0
$600 < \varepsilon \leq 650$	1	0
$650 < \varepsilon \leq 700$	2	0
$700 < \varepsilon \leq 750$	1	0
$750 < \varepsilon \leq 800$	1	0
$E > 800$	12	0

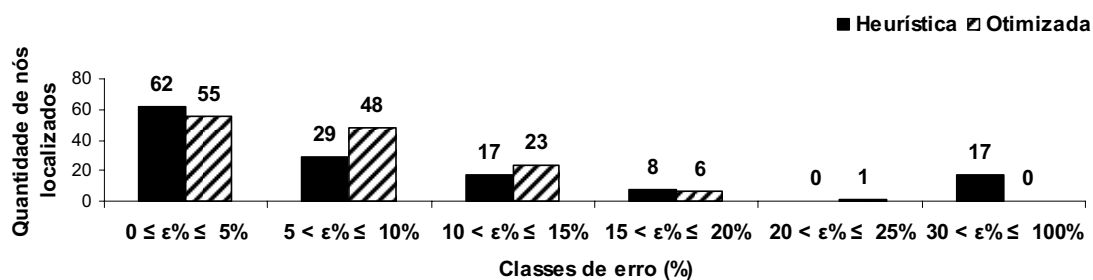


Gráfico 5.49 – Quantidade de nós localizados para cada classe de erro percentual.

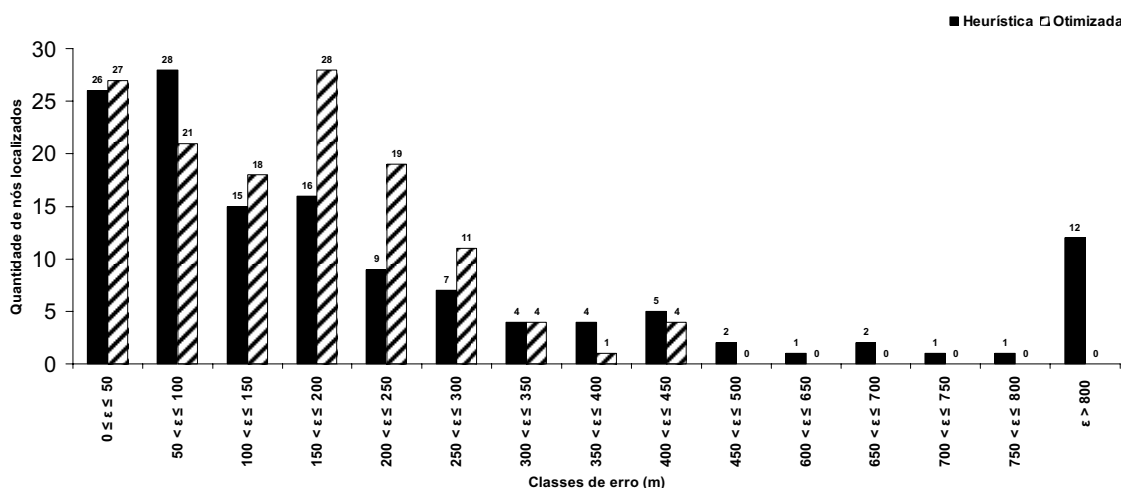


Gráfico 5.50 – Número de nós localizados para cada classe de erro absoluto.

Pela análise dos gráficos 5.49 e 5.50, verifica-se que, embora a configuração otimizada tenha reduzido a quantidade de nós localizados na faixa de erro de 0 a 5% — passou de 62 para 55 —, o erro percentual máximo é igual a 25%, e o erro máximo na distância é igual a 450 metros. Para a configuração de instalação dos medidores utilizados no teste 10, o erro percentual máximo é maior que 30%, e o erro máximo na distância é maior que 800 metros.

Teste 23 – Foi realizado considerando a localização de faltas utilizando a configuração obtida através do algoritmo para a alocação otimizada dos medidores de tensão. As considerações para o teste 23 são as mesmas do teste 21, e os resultados estão apresentados nas tabelas 5.40 e 5.41 e nos gráficos 5.51 e 5.52.

Tabela 5.40 – Quantidade de nós localizados para cada classe de erro percentual.

Faixas para o erro percentual na distância	Quantidade de nós localizados	
	Teste 21	Teste 23
$0 \leq \varepsilon\% \leq 5\%$	73	69
$5 < \varepsilon\% \leq 10\%$	37	38
$10 < \varepsilon\% \leq 15\%$	14	20
$15 < \varepsilon\% \leq 20\%$	3	5
$20 < \varepsilon\% \leq 25\%$	1	1
$25 < \varepsilon\% \leq 30\%$	1	0
$30 < \varepsilon\% \leq 100\%$	4	0

Tabela 5.41 – Quantidade de nós localizados para cada classe de erro na distância.

Faixas para o erro na distância (m)	Quantidade de nós localizados	
	Teste 21	Teste 23
$0 \leq \varepsilon \leq 50$	44	47
$50 < \varepsilon \leq 100$	26	18
$100 < \varepsilon \leq 150$	17	13
$150 < \varepsilon \leq 200$	17	23
$200 < \varepsilon \leq 250$	10	16
$250 < \varepsilon \leq 300$	5	7
$300 < \varepsilon \leq 350$	6	5
$350 < \varepsilon \leq 400$	2	1
$400 < \varepsilon \leq 450$	0	2
$450 < \varepsilon \leq 500$	2	1
$600 < \varepsilon \leq 650$	1	0
$650 < \varepsilon \leq 700$	2	0
$700 < \varepsilon \leq 750$	1	0

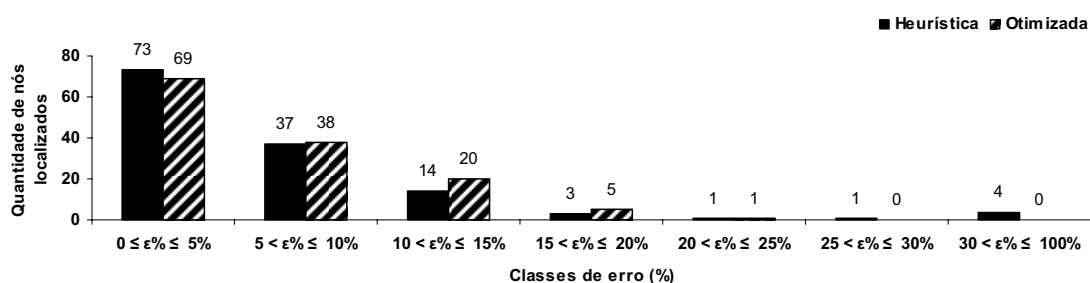


Gráfico 5.51 – Quantidade de nós localizados para cada classe de erro percentual.

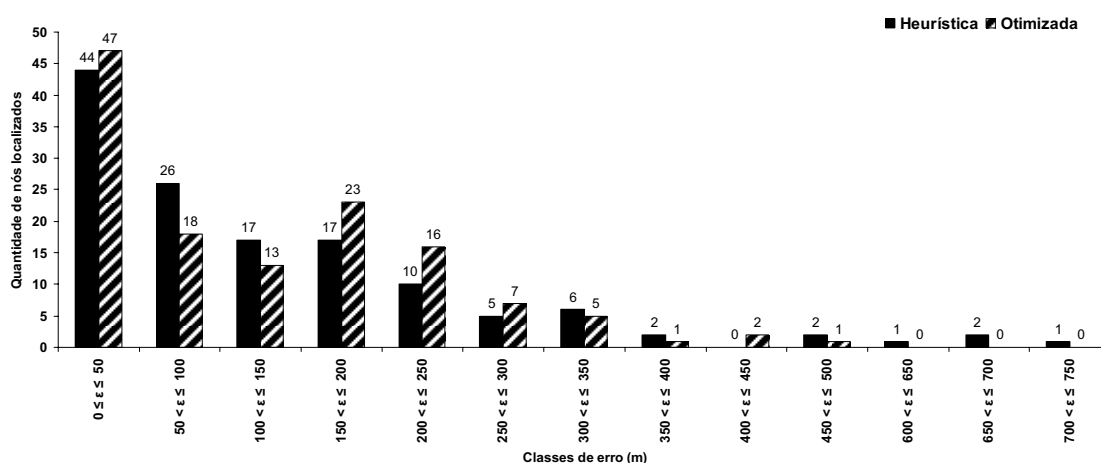


Gráfico 5.52 – Número de nós localizados para cada classe de erro absoluto.

A análise dos gráficos 5.51 e 5.52 permite observar que, para este teste, a configuração otimizada reduziu a quantidade de nós localizados na faixa de erro de 0 a 5% — passou de 73 para 69 —, sendo que o erro percentual máximo é igual a 25%, e o erro máximo na distância é igual a 500 metros. Para a configuração de instalação dos medidores utilizados no teste 21, o

erro percentual máximo é maior que 30%, e o erro máximo na distância é maior que 700 metros.

Assim, verifica-se que a alocação otimizada melhora sensivelmente a localização das faltas, evitando que as mesmas sejam localizadas dentro das classes contendo maiores erros, seja no erro percentual na distância ou no erro absoluto na distância. Verifica-se, também, que a solução otimizada encontrada, tendo em vista as considerações feitas para o teste 10, também é viável para outros, como mostrado no teste 23.

5.5 Análise da aplicação do algoritmo de localização de faltas proposto para faltas bifásicas e trifásicas com e sem contato com a terra

Os resultados apresentados nas subseções 5.4 e 5.5 são focados na aplicação do algoritmo proposto para localização de faltas fase-terra. Para esse tipo de falta, foram feitas várias análises com o propósito de verificar a robustez, a precisão e a aplicabilidade do algoritmo. Embora as faltas fase-terra constituam a grande maioria das faltas que ocorrem em um alimentador de distribuição, são apresentados, nesta subseção, os testes 24 a 27 que analisam a aplicação e os resultados obtidos com o algoritmo de localização de faltas para faltas bifásicas, bifásicas à terra, trifásicas e trifásicas à terra, considerando os medidores instalados nos nós fornecidos pela alocação otimizada para o teste 22. Na figura 5.11, ilustra-se a representação para faltas bifásica, bifásica à terra, trifásica e trifásica à terra.

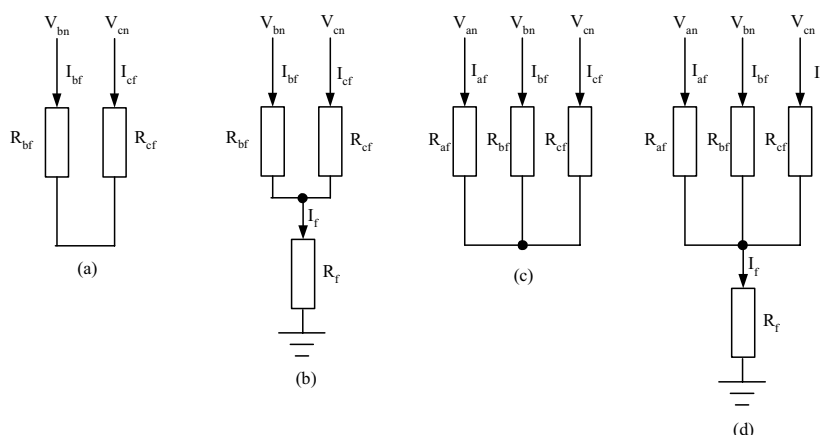


Figura 5.11 – Representação para faltas: (a) bifásica, (b) bifásica à terra, (c) trifásica e (d) trifásica à terra.

Teste 24 – Consiste na localização de uma falta bifásica entre as fases B e C. As considerações são:

Para a simulação das faltas:

- Resistências de falta $R_{bf} = 0,10$ ohms e $R_{cf} = 0,10$ ohms;

- Transformadores com carregamento de 100% (carga nominal);
- Cargas modeladas como impedâncias constantes.

Para a localização das faltas:

- Transformadores com carregamento estimado de acordo com a subsecção 3.4 e $\beta_i = 1,0$;
- Modelo combinado de carga, equação (2.27), com $\alpha = 33,0$; $\beta = 34,0$ e $\delta = 33,0$.

No gráfico 5.53, representam-se os 15 primeiros nós do *ranking* dos prováveis nós em falta, para uma falta ocorrendo no nó 35. Verifica-se, para este teste, que o algoritmo classifica como primeira opção do *ranking* o nó 35, que é o local de incidência da falta.

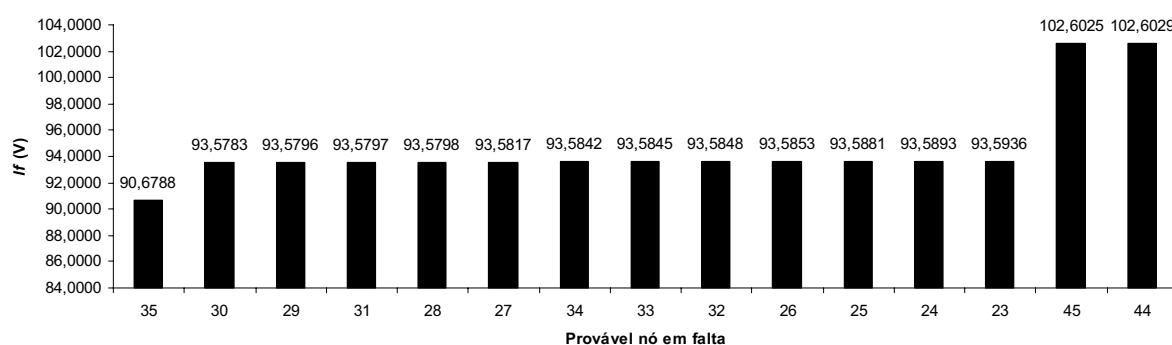


Gráfico 5.53 – *Ranking* dos 15 primeiros nós entre os prováveis nós em falta, para uma falta ocorrendo no nó 35.

No gráfico 5.54, representam-se os 15 primeiros nós do *ranking* dos prováveis nós em falta, para uma falta no nó 10. Verifica-se, para este teste, que o algoritmo não classifica como primeira opção do *ranking* o nó 10, onde realmente ocorreu a falta, e sim o nó 20. Verifica-se, no gráfico 5.54, que o *lf* para o primeiro nó do *ranking* é 116,21 V, aumentando para 116,22, para o nó 10 (nó em falta), que ocupa a décima segunda posição do *ranking*. Já o nó 22, que ocupa a décima terceira posição no *ranking*, tem um *lf* igual a 118,05 V, e o décimo quinto nó do *ranking* tem um *lf* igual a 134,57 V. Na figura 5.12, ilustra-se a região contendo os nós das 12 primeiras posições do *ranking*.

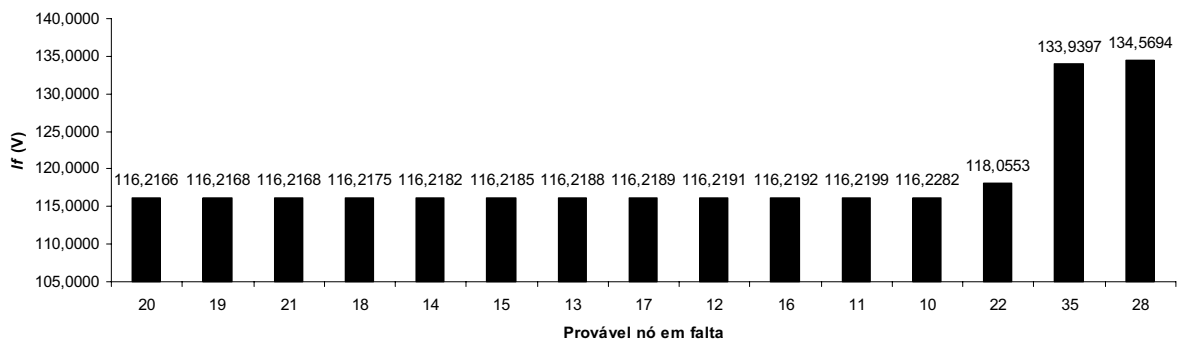


Gráfico 5.54 – *Ranking* dos 15 primeiros nós entre os prováveis nós em falta, para uma falta ocorrendo no nó 10.

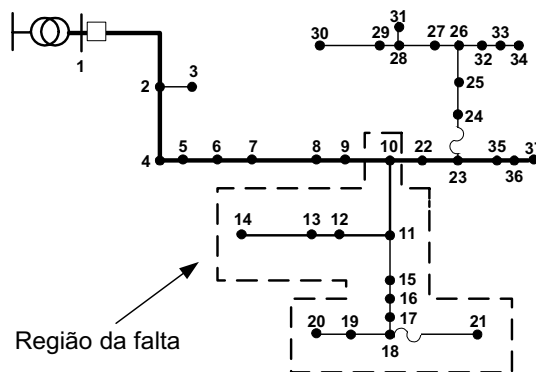


Figura 5.12 – Região em falta indicada pelo algoritmo, para uma falta no nó 10.

Teste 25 – Consiste na localização de uma falta bifásica, fases B e C à terra. As considerações são:

Para a simulação das faltas:

- Resistências de falta $R_{bf} = 0,10$ ohms, $R_{cf} = 0,10$ ohms e $R_f = 5,00$ ohms;
- Transformadores com carregamento de 100% (carga nominal);
- Cargas modeladas como impedâncias constantes.

Para a localização das faltas:

- Transformadores com carregamento estimado de acordo com a subseção 3.4 e $\beta_i = 1,0$;
- Modelo combinado de carga, equação (2.27), com $\alpha = 33,0$; $\beta = 34,0$ e $\delta = 33,0$.

No gráfico 5.55, apresentam-se os 15 primeiros nós do *ranking* dos prováveis nós em falta, para uma falta no nó 105. Verifica-se, para este teste, que o algoritmo classifica como primeira opção do *ranking* o nó 105, o local de incidência da falta.

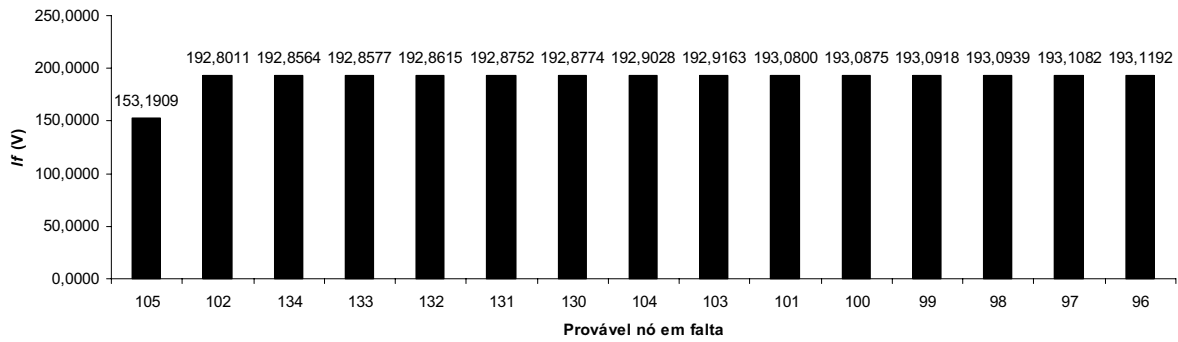


Gráfico 5.55 – *Ranking* dos 15 primeiros nós entre os prováveis nós em falta, para uma falta ocorrendo no nó 105.

No gráfico 5.56, representam-se os 15 primeiros nós do *ranking* dos prováveis nós em falta, para uma falta ocorrendo no nó 51. Verifica-se, para este teste, que o algoritmo não classifica como primeira opção do *ranking* o nó 51, onde realmente ocorreu a falta, e sim o nó 47. Na figura 5.13, ilustra-se a região contendo os nós das 10 primeiras posições do *ranking*.

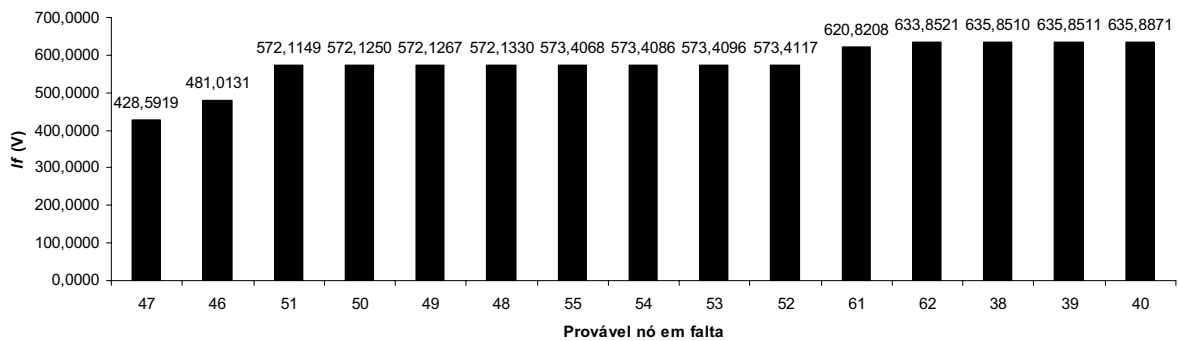


Gráfico 5.56 – *Ranking* dos 15 primeiros nós entre os prováveis nós em falta, para uma falta ocorrendo no nó 51.

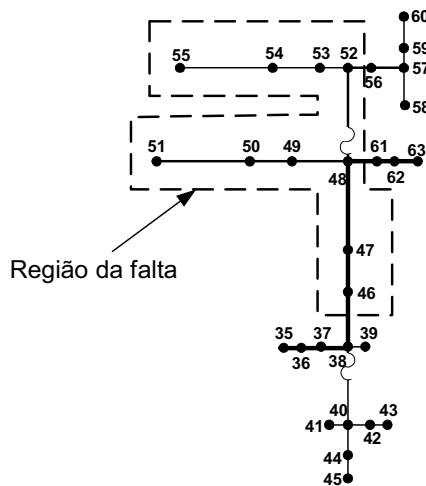


Figura 5.13 – Região em falta indicada pelo algoritmo, para uma falta no nó 51.

Teste 26 – Consiste na localização de uma falta trifásica. As considerações são:

Para a simulação das faltas:

- Resistências de falta $R_{af} = R_{bf} = R_{cf} = 1,00$ ohms;
- Transformadores com carregamento de 100% (carga nominal);
- Cargas modeladas como impedâncias constantes.

Para a localização das faltas:

- Transformadores com carregamento estimado de acordo com a subseção 3.4 e $\beta_i = 1,0$;
- Modelo combinado de carga, equação (2.27), com $\alpha = 33,0$; $\beta = 34,0$ e $\delta = 33,0$.

No gráfico 5.57, apresentam-se os 15 primeiros nós do *ranking* dos prováveis nós em falta, para uma falta ocorrendo no nó 89. Verifica-se que, para este teste, o algoritmo classifica como primeira opção do *ranking* o nó 89, que é o local de incidência da falta.

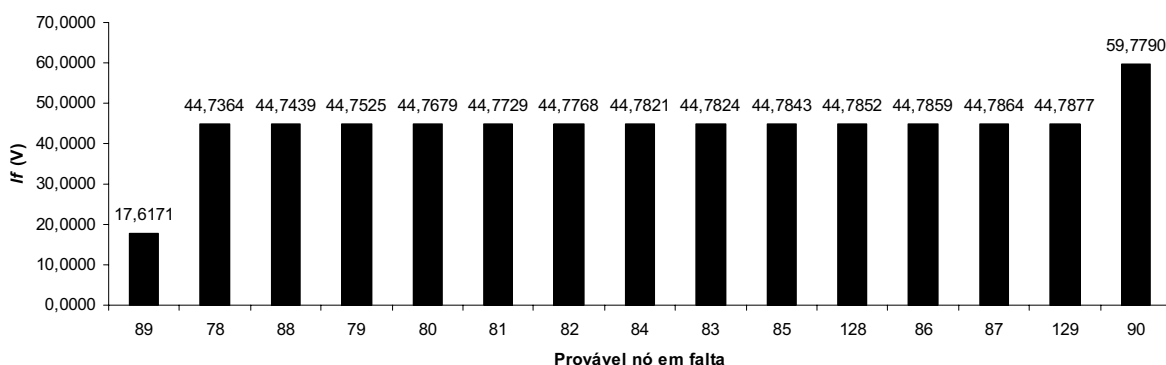


Gráfico 5.57 – *Ranking* dos 15 primeiros nós entre os prováveis nós em falta, para uma falta ocorrendo no nó 89.

No gráfico 5.58, apresentam-se os 15 primeiros nós do *ranking* dos prováveis nós em falta, para uma falta ocorrendo no nó 71. Verifica-se, para este teste, que o algoritmo não classifica como primeira opção do *ranking* o nó 71, onde realmente ocorreu a falta, e sim o nó 62. Verifica-se, no gráfico 5.58, que a diferença entre os *If*'s para os nós da segunda à décima quinta posição do *ranking* é 0,21 V. Na figura 5.14, ilustra-se a região contendo os nós das 15 primeiras posições do *ranking*.

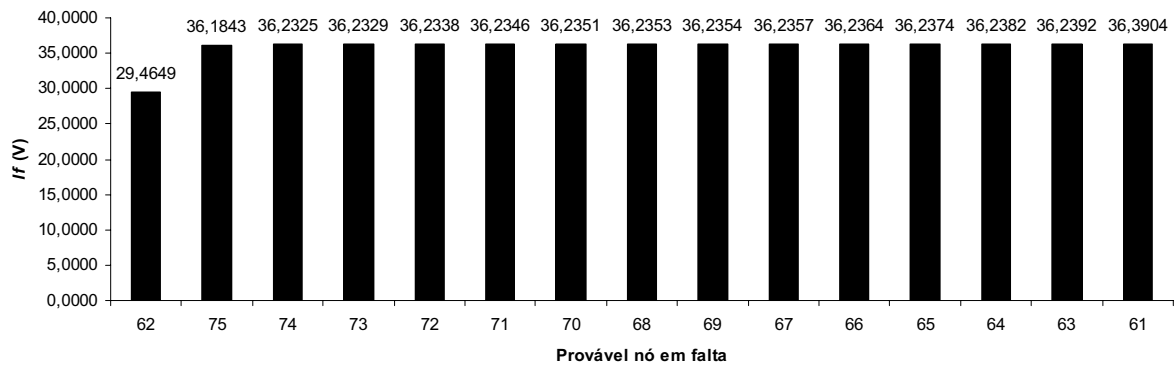


Gráfico 5.58 – *Ranking* dos 15 primeiros nós entre os prováveis nós em falta, para uma falta ocorrendo no nó 71.

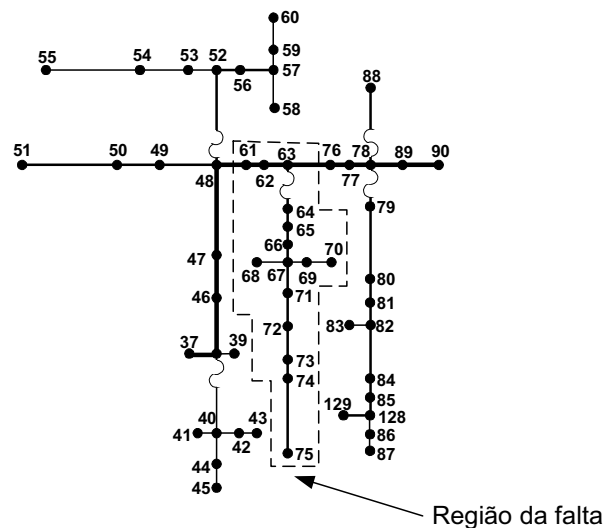


Figura 5.14 – Região em falta indicada pelo algoritmo, para uma falta no nó 71.

Teste 27 – Consiste na localização de uma falta trifásica à terra. As considerações são:

Para a simulação das faltas:

- Resistências de falta $R_{af} = R_{bf} = R_{cf} = 1,00$ ohms e $R_f = 5,00$ ohms;
- Transformadores com carregamento de 100% (carga nominal);
- Cargas modeladas como impedâncias constantes.

Para a localização das faltas:

- Transformadores com carregamento estimado de acordo com a subseção 3.4 e $\beta_i = 1,0$;
- Modelo combinado de carga, equação (2.27), com $\alpha = 33,0$; $\beta = 34,0$ e $\delta = 33,0$.

No gráfico 5.59, apresentam-se os 15 primeiros nós do *ranking* dos prováveis nós em falta, para uma falta ocorrendo no nó 103. Verifica-se, para este teste, que o algoritmo classifica como primeira opção do *ranking* o nó 103, o local de ocorrência da falta.

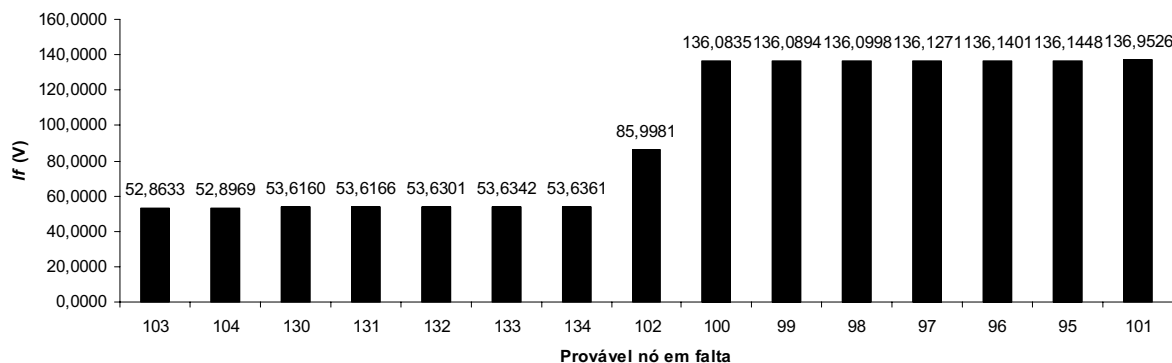


Gráfico 5.59 – *Ranking* dos 15 primeiros nós entre os prováveis nós em falta, para uma falta ocorrendo no nó 103.

No gráfico 5.60, apresentam-se os 15 primeiros nós do *ranking* dos prováveis nós em falta, para uma falta ocorrendo no nó 32. Verifica-se, para este teste, que o algoritmo não classifica como primeira opção do *ranking* o nó 32, onde realmente ocorreu a falta, e sim o nó 22. Verifica-se, no gráfico 5.60, que a diferença entre os *If*'s para os nós que ocupam desde a segunda até a décima terceira posição do *ranking* é menor que 0,05 V. Na figura 5.15, ilustra-se a região contendo os nós das 13 primeiras posições do *ranking*.

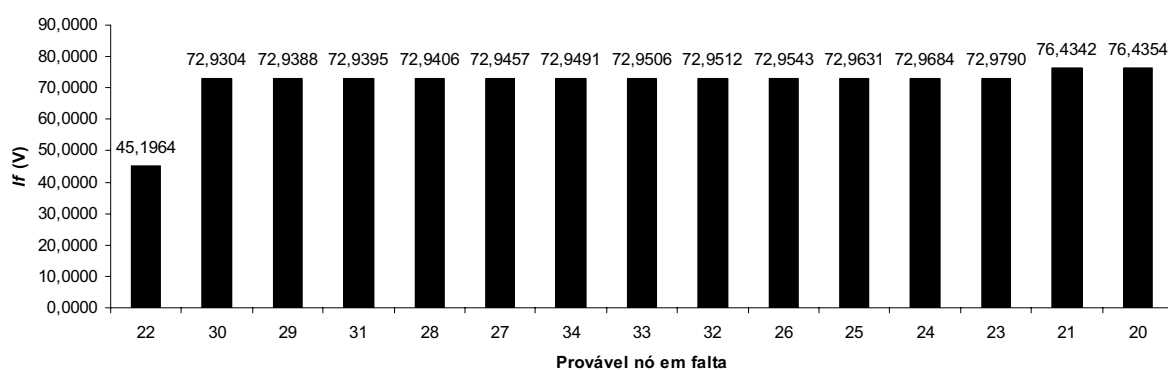


Gráfico 5.60 – *Ranking* dos 15 primeiros nós entre os prováveis nós em falta, para uma falta ocorrendo no nó 32.

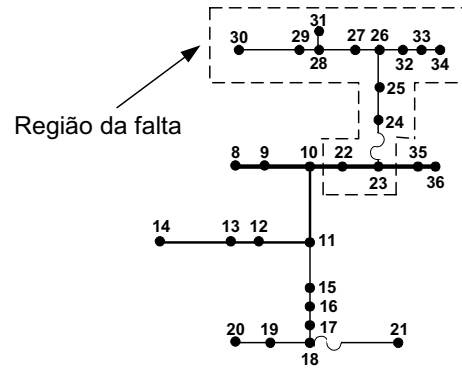


Figura 5.15 – Região em falta indicada pelo algoritmo, para uma falha no nó 32.

6 Conclusões e Trabalhos Futuros

Uma metodologia simples e eficiente que utiliza medições esparsas de tensão para localização de faltas em alimentadores de distribuição de energia elétrica foi proposta neste trabalho de pesquisa. Esta metodologia pode ser utilizada com poucos investimentos adicionais pela maioria das empresas distribuidoras, necessitando, para isto, de sistemas de controle e medição na subestação e em alguns pontos remotos do alimentador.

Para implantar esta metodologia necessita-se de, pelo menos, 2 pontos de medições remotos ao longo do alimentador para que o processo de localização de faltas seja executado. Obviamente, como discutido nos capítulos 3, 4 e 5, a quantidade de medidores de tensão utilizados e os locais de instalação dos mesmos na rede afetam diretamente a precisão do algoritmo. Investimentos na transmissão remota de dados também são necessários, mas, com os avanços na área de comunicações, existem, no mercado, equipamentos de baixo custo que podem ser utilizados para tal finalidade. Alguns equipamentos de controle e proteção existentes no mercado já são equipados com unidades terminais remotas (UTR).

Os resultados obtidos com os testes executados para verificar a robustez e eficiência da metodologia mostram que, em condições operacionais e de possibilidade de incidência de faltas cuidadosamente escolhidas para contemplar possíveis situações reais e algumas outras

irreais, mas que dificultam a localização de faltas, a técnica desenvolvida é uma excelente ferramenta para auxiliar no processo de busca de locais de faltas, principalmente quando esses locais que apresentam problemas estão ocultos na rede. Pode-se concluir também, a partir dos resultados dos testes, que mesmo o nó em falta não sendo indicado na primeira posição do *ranking*, a metodologia fornece uma excelente indicação da região em falta. Desta forma, a metodologia proposta, aliada a sua simplicidade, é um excelente auxílio para indicar para as equipes de manutenção qual direção deve ser tomada, minimizando, portanto, os tempos de busca do local do defeito, reconfiguração da rede, reparos e restabelecimento do fornecimento de energia elétrica.

Para obter a máxima eficiência da metodologia frente a condições adversas, executou-se a alocação otimizada dos medidores de tensão ao longo do alimentador. Com a alocação otimizada, mesmo quando o algoritmo não encontra com 100% de precisão o local da falta, na maioria das vezes, é eficiente para localizar a região da falta. Assim, para faltas de difícil localização visual, o uso desta metodologia implementada em sistemas de supervisão e controle das empresas distribuidoras reduz o tempo de busca do local da falta, minimizando os transtornos causados aos clientes e os prejuízos para a empresa distribuidora, decorrentes da descontinuidade do fornecimento de energia elétrica. Os resultados obtidos com os testes efetuados mostram a viabilidade do modelo de alocação otimizada, que apresenta soluções confiáveis e tecnicamente viáveis. Em todos os testes realizados, o algoritmo genético dedicado apresentou desempenho satisfatório, robustez e convergiu para soluções otimizadas de boa qualidade.

Para desenvolvimentos futuros deste trabalho, dentre outros aspectos, propõe-se que sejam pesquisados e tratados os seguintes aspectos do problema:

- Implementar esta metodologia para localização de faltas em um alimentador real de distribuição. No desenvolvimento do sistema de medição, hardware e software, com vistas a melhorar a precisão do algoritmo para localização de faltas (aumentar a taxa de acertos), propõe-se um sistema integrado para localização do ponto de incidência de faltas em sistemas radiais de distribuição, composto dos seguintes módulos:

1. Aquisição (Classe de Precisão de TP, TC, Conversores A/D) e processamento do sinal referente à falta na S/E(Transformada de Fourier, valor eficaz, etc.);
2. Aquisição e processamento de sinais referentes à tensão onde existem equipamentos de medição instalados na rede de distribuição da empresa;
3. Formação da base de conhecimentos:

- Dados nominais e de ajustes dos dispositivos de proteção - relés, religadores, fusíveis;
 - Informações topológicas do alimentador, tais como locais de instalação de dispositivos de proteção e chaves de manobras para restauração da rede;
 - Dados estatísticos referentes à confiabilidade do alimentador – Índices de faltas permanentes e temporárias (armazenados e atualizados na base de dados em função do uso contínuo do sistema localizador de faltas), informações de medições de corrente e tensão, na saída da subestação, e medições de tensão fornecidas por medidores esparsos equipados UTRs, localizados em pontos da rede, além de dados históricos do alimentador. Esses dados poderiam ser os índices de confiabilidade do sistema, informações do projeto de seletividade e coordenação da proteção, resultados de simulações de fluxo de potência e curto-circuito.
4. Desenvolver e implementar um algoritmo que utilize uma base de conhecimento e técnicas de análise e modelos de circuitos elétricos para determinar com precisão adequada o ponto de incidência da falta.
- Efetuar melhoria na técnica proposta, a fim de contemplar alimentadores não radiais com a possibilidade de possuírem geradores distribuídos alocados. Neste caso, todas as ferramentas de análise de rede devem ser reavaliadas para contemplar este tipo de rede.
 - Desenvolver melhorias no modelo de alocação otimizada de medidores que contemple, simultaneamente, a localização de todos os tipos de faltas. Neste contexto, devem-se priorizar as faltas fase-terra, que são o tipo de faltas de maior incidência em redes de distribuição.

Referências

- [1] – TANG, Y.; WANG, H. F.; AGGARWAL, R. K.; JOHNS, A. T. Fault indicators in transmission and distribution systems. IEEE Proceedings of the International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, pp. 238 – 243, 2000.
- [2] – 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, v. 71, n. 2, pp. 169 – 177, 2004.
- [3] – ABUR, A.; GALIJASEVIC, Z. Fault location using voltage measurements. IEEE Transactions on Power Delivery, New York, v. 17, n. 2, p.441 – 445,
- [4] – PEREIRA, R. A. F. Localização de faltas fase-terra em circuitos radiais de distribuição através de algoritmos de busca inteligente. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, pp. 1 – 147, 2003.
- [5] – PEREIRA, R. A. F.; DA SILVA, L. G. W.; MANTOVANI, J. R. S. Localização de faltas fase-terra em alimentadores radiais de distribuição utilizando aquisição de dados esparsos sincronizados. Anais do XV Congresso Brasileiro de Automática, 2004.

- [6] – PEREIRA, R. A. F.; DA SILVA, L. G. W.; MANTOVANI, J. R. S. PMUs optimized allocation using a tabu search algorithm for fault location in electric power distribution system. IEEE/PES Proceedings of the Latin América Transmission and Distribution Conference and Exposition, pp. 143 – 148, 2004.
- [7] – PEREIRA, R. A. F.; DA SILVA, L. G. W.; KEZUNOVIC, M.; MANTOVANI, J. R. S. Location of single line-to-ground faults on distribution feeders using voltage measurements. IEEE/PES Proceedings of the Latin América Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2006.
- [8] – PEREIRA, R. A. F.; DA SILVA, L. G. W.; KEZUNOVIC, M.; MANTOVANI, J. R. S. Optimized placement of voltage measurement device for determining location of single line-to-ground faults on overhead electric power distribution feeders. Anais do XVI Congresso Brasileiro de Automática, 2006.
- [9] – LEHTONEN, M.; PETTISSALO, S.; ETULA, J. H. Calculational fault location for electrical distribution networks. IEEE Proceedings of the third International conference on Power System Monitoring and Control, pp. 38 – 43, 1991.
- [10] – GIRGIS, A. A.; FALLON C. M. Fault location techniques for radial and loop transmission systems using digital fault recorded data. IEEE Transactions on Power Delivery, New York, v. 7, n. 4, pp. 1936 – 1945, 1992.
- [11] – GIRGIS, A. A.; FALLON, C. M.; LUBKEMAN, D. L. A fault location technique for rural distribution feeders. IEEE Transactions on Industry Applications, v. 29, n. 6, pp. 1170 – 1175, 1993.
- [12] – DAS, R.; SACHDEV, M. S.; SIDHU, T. S. A technique for estimating locations of shunt faults on distribution lines. IEEE Proceedings of Communications, Power and Computing Conference, v. 1, pp. 6 – 11, 1995.
- [13] – SACHDEV, M. S.; DAS, R.; SIDHU, T.S. Determining .locations of faults in distribution systems. IEE Proceedings of the Sixth International Conference on Developments in Power System Protection, pp. 188 – 191, 1997.
- [14] – DAS, R.; SACHDEV, M. S.; SIDHU, T. S. A fault locator for radial subtransmission and distribution lines. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, v. 1, pp. 443 – 448, 2000.
- [15] – AGGARWAL, R. K.; ASLAN, Y.; JOHNS, A. T. An interactive approach to fault location on overhead distribution lines with load taps. IEE Proceedings of the Sixth International Conference on Developments in Power System Protection, pp. 184 – 187, 1997.

- [16] – AGGARWAL, R. K.; ASLAN, Y.; JOHNS, A. T. New concept in fault location for overhead distribution systems using superimposed components. *IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution*, v. 144, n. 3, pp. 309 – 316, 1997.
- [17] – ZHU, J.; LUBKEMAN, D. L.; GIRGIS, A. A. Automated fault location and diagnosis on electric power distribution feeders. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 12, n. 2, pp. 801 – 809, 1997.
- [18] – LEHTONEN, M.; MATSINEN, A.; ANTILA, E.; KURU, J.; VUORENPAA, P.; MATINLASSI, E.; PETTISSALO, S. Automatic fault management in distribution networks. *16th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, CIRED*, v. 3, 2001.
- [19] – LEE, S. J.; CHOI, M. S.; KANG, S., H.; JIN, B. G.; LEE, D. S.; AHN, B. S.; YOON, N. S.; KIM, H. Y., WEE, S. B. An intelligent and efficient fault location and diagnosis scheme for radial distribution systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 19, n. 2, pp. 524 – 532, 2004.
- [20] – SENGER, E. C.; MANASSERO, G. Jr.; GOLDEMBERG, C.; PELLINI, E. L. Automated fault location system for primary distribution networks. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 20, n. 2, pp. 1332 – 1340, 2005.
- [21] – LI, H.; MOKHAR, A. S.; JENKINS, N. Automated fault location on distribution network using voltage sags measurements. *18th International conference and Exhibition on Electricity Distribution, CIRED*, 2005.
- [22] – GOHOKAR, V. N.; KHEDKAR, M. K. Faults locations in automated distribution system. *Electric Power Systems Research*, v. 75, pp. 51 – 55, 2005.
- [23] – WON, D. J.; CHUNG, I. Y.; KIM, J. M.; MOON, S. I.; SEO, J. C.; CHOE, J. W. A new algorithm to locate power-quality event source with improved realization of distributed monitoring scheme. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 21, n. 3, pp. 1641 – 1674, 2006.
- [24] – CHENG, C. S.; SHIRMOHAMMADI, D. A three-phase power flow method for real-time distribution system analysis. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 10, n. 2, pp. 671 – 679, 1995.
- [25] – CHEN, T. H.; CHEN, M. S.; HWANG, K. J.; KOTAS, P.; CHEBLI, E. A. Distribution system power flow analysis – a rigid approach. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 6, n. 3, pp. 1146 – 1152, 1991.

[26] – REINERI, C. A.; ALVAREZ, C. Load research for fault location in distribution feeders. IEE Proceedings of Generation, Transmission and Distribution, v. 146, n. 2, pp. 115 – 120, 1999.

[27] GLOVER, F.; KOCHENBERGER, G. A. Handbook of Metaheuristics, Klumer Academic Publishers, 2003.

Apêndice A – Dados do alimentador

Como citado no Capítulo 5, os testes foram executados para um alimentador de distribuição trifásico, real, com 134 nós, tensão nominal de 13,8 kV e potência nominal de 7,065 MVA, cujo diagrama unifilar é mostrado na figura 5.1. A tabela A1 contém os dados desse alimentador, sendo que as potências especificadas nesta tabela estão conectadas aos nós listados na coluna designada por “Nó Final”. As matrizes de impedâncias de rede para cada trecho de rede estão listadas após a tabela A1.

Tabela A1 – Dados do alimentador utilizado nos testes do algoritmo de localização de faltas proposto.

Nó Inicial	Nó Final	Distância (m)	Bitola do Condutor	Potência (KVA)
0	1	-----	-----	0,00
1	2	900,00	#4/0	0,00
2	3	50,00	#2	45,00
2	4	100,00	#4/0	0,00
4	5	40,00	#4/0	75,00
5	6	200,00	#4/0	75,00
6	7	200,00	#4/0	112,50
7	8	200,00	#4/0	75,00
8	9	10,00	#4/0	75,00

9	10	50,00	#4/0	0,00
10	11	100,00	#4	0,00
11	12	60,00	#4	8,60
12	13	30,00	#4	75,00
13	14	160,00	#4	75,00
11	15	30,00	#4	112,50
15	16	10,00	#4	45,00
16	17	20,00	#4	112,50
17	18	40,00	#4	0,00
18	19	40,00	#2	75,00
19	20	50,00	#2	112,50
18	21	150,00	#2	112,50
10	22	30,00	#4/0	112,50
22	23	70,00	#4/0	0,00
23	24	50,00	#4	3,00
24	25	20,00	#4	45,00
25	26	30,00	#4	0,00
26	27	60,00	#2	112,50
27	28	40,00	#2	0,00
28	29	20,00	#2	75,00
29	30	120,00	#2	112,50
28	31	20,00	#2	112,50
26	32	20,00	#4	112,50
32	33	5,00	#4	112,50
33	34	25,00	#4	112,50
23	35	10,00	#4/0	0,00
35	36	70,00	#4/0	12,40
36	37	10,00	#4/0	112,50
37	38	10,00	#4/0	0,00
38	39	70,00	#4/0	3,00
38	40	100,00	#4/0	0,00
40	41	60,00	#4	75,00
40	42	50,00	#4	75,00
42	43	10,00	#4	75,00
40	44	30,00	#4/0	112,50
44	45	40,00	#4/0	45,00
38	46	60,00	#4/0	1,00
46	47	20,00	#4/0	112,50
47	48	120,00	#4/0	0,00
48	49	50,00	#4/0	112,50
49	50	20,00	#4/0	75,00
50	51	170,00	#4/0	112,50
48	52	100,00	#4/0	0,00
52	53	60,00	#4	1,20
53	54	30,00	#4	112,50
54	55	130,00	#4	75,00
52	56	20,00	#4	75,00
56	57	80,00	#4	0,00
57	58	50,00	#2	10,00
57	59	60,00	#2	112,50
59	60	20,00	#2	3,80
48	61	40,00	#4/0	3,00

61	62	10,00	#4/0	5,50
62	63	50,00	#4/0	0,00
63	64	30,00	#1/0	75,00
64	65	20,00	#1/0	75,00
65	66	30,00	#1/0	3,50
66	67	20,00	#1/0	0,00
67	68	30,00	#4	112,50
67	69	20,00	#4	7,00
69	70	20,00	#4	112,50
67	71	50,00	#1/0	75,00
71	72	40,00	#1/0	8,50
72	73	40,00	#1/0	1,90
73	74	20,00	#1/0	112,50
74	75	110,00	#1/0	112,50
63	76	20,00	#4/0	112,50
76	77	30,00	#4/0	5,90
77	78	50,00	#4/0	0,00
78	79	70,00	#4/0	75,00
79	80	70,00	#4/0	112,50
80	81	30,00	#4/0	112,50
81	82	30,00	#4/0	0,00
82	83	50,00	#4	75,00
82	84	50,00	#4/0	75,00
84	85	30,00	#4/0	112,50
85	128	20,00	#4/0	0,00
128	86	30,00	#4/0	15,50
86	87	20,00	#4/0	75,00
78	88	130,00	#2	75,00
78	89	50,00	#4/0	75,00
89	90	50,00	#4/0	0,00
90	91	180,00	#4/0	45,00
91	92	20,00	#4/0	0,00
92	93	30,00	#2	112,50
92	94	70,00	#2	23,50
92	95	100,00	#4/0	0,00
95	96	40,00	#2	75,00
95	97	50,00	#2	6,00
97	98	60,00	#2	0,00
98	99	110,00	#4	23,50
98	100	40,00	#2	75,00
100	101	110,00	#2	112,50
95	102	60,00	#4/0	112,50
102	103	40,00	#4/0	0,00
103	104	30,00	#1/0	75,00
103	105	150,00	#1/0	75,00
105	106	210,00	#1/0	108,50
106	107	30,00	#1/0	0,00
107	108	100,00	#1/0	0,00
108	109	100,00	#4	108,50
109	110	30,00	#4	112,50
110	111	20,00	#4	112,50
107	112	170,00	#4/0	75,00

112	113	110,00	#4/0	0,00
113	114	110,00	#4	0,00
113	115	200,00	#4	30,00
115	116	200,00	#4	30,00
116	117	200,00	#4	30,00
117	118	200,00	#4	30,00
90	119	110,00	#2	0,00
119	120	70,00	#4/0	0,00
120	121	70,00	#4/0	30,00
119	122	70,00	#2	55,00
122	123	130,00	#4	0,00
123	124	20,00	#4	15,50
123	125	20,00	#4	15,50
125	126	40,00	#4	45,00
126	127	40,00	#4	112,50
128	129	60,00	#2	45,00
104	130	70,00	#1/0	0,00
130	131	20,00	#4/0	112,50
130	132	100,00	#1/0	0,00
132	133	40,00	#1/0	112,50
133	134	40,00	#1/0	112,50

As matrizes de impedâncias de redes, para as várias seções do alimentador, são as seguintes:

– Seção 0 – 1, correspondente à impedância equivalente do sistema de geração, transmissão e impedância do transformador da subestação:

$$[Z_{0-1}] = \begin{bmatrix} 0,2900 + j1,9200 & 0,1960 + j0,5300 & 0,1960 + j0,5300 \\ 0,1960 + j0,5300 & 0,2900 + j1,9200 & 0,1960 + j0,5300 \\ 0,1960 + j0,5300 & 0,1960 + j0,5300 & 0,2900 + j1,9200 \end{bmatrix} [\Omega]$$

– Seção com condutores de bitola #2:

$$[Z_{\#2}] = \begin{bmatrix} 1,0840 + j0,9980 & 0,0600 + j0,4780 & 0,0600 + j0,4500 \\ 0,0600 + j0,4780 & 1,0840 + j0,9980 & 0,0600 + j0,5360 \\ 0,0600 + j0,4500 & 0,0600 + j0,5360 & 1,0840 + j0,9980 \end{bmatrix} [\Omega / Km]$$

– Seção com condutores de bitola #4:

$$[Z_{\#4}] = \begin{bmatrix} 1,6440 + j1,0060 & 0,0600 + j0,4780 & 0,0600 + j0,4500 \\ 0,0600 + j0,4780 & 1,6440 + j1,0060 & 0,0600 + j0,5360 \\ 0,0600 + j0,4500 & 0,0600 + j0,5360 & 1,6440 + j1,0060 \end{bmatrix} [\Omega / Km]$$

– Seção com condutores de bitola #1/0:

$$[Z_{\#1/0}] = \begin{bmatrix} 0,7567 + j1,0067 & 0,0600 + j0,4780 & 0,0600 + j0,4500 \\ 0,0600 + j0,4780 & 0,7567 + j1,0067 & 0,0600 + j0,5360 \\ 0,0600 + j0,4500 & 0,0600 + j0,5360 & 0,7567 + j1,0067 \end{bmatrix} [\Omega / Km]$$

– Seção com condutores de bitola #4/0:

$$[Z_{\#4/0}] = \begin{bmatrix} 0,4272 + j0,9609 & 0,0600 + j0,4780 & 0,0600 + j0,4500 \\ 0,0600 + j0,4780 & 0,4272 + j0,9609 & 0,0600 + j0,5360 \\ 0,0600 + j0,4500 & 0,0600 + j0,5360 & 0,4272 + j0,9609 \end{bmatrix} [\Omega / Km]$$

Apêndice B – Arquivos de dados do ATP

Para exemplificar as simulações no ATP, a seguir são apresentadas partes dos arquivos de dados utilizados nas simulações. Deve-se observar que, nos arquivos, não estão presentes todos os dados das linhas e das cargas. O primeiro arquivo está relacionado com a simulação das condições pré-falta, para obtenção das grandezas em regime permanente. O segundo arquivo relaciona-se com a simulação da falta a ser localizada, para a obtenção das grandezas durante a falta; no entanto, considera-se regime permanente para a falta. Na obtenção desse segundo arquivo, tem-se em vista que o objetivo principal deste trabalho de pesquisa é a proposta de uma técnica e de um algoritmo para localização de faltas, e não a aquisição e tratamento dos sinais das grandezas elétricas utilizadas como dados de entrada para a técnica de localização proposta. Os transitórios decorrentes da falta não foram considerados nas simulações (todas as faltas foram simuladas desconsiderando o transitório).

```

BEGIN NEW DATA CASE
C -----
C Arquivo de dados para simulação das condições pré-falta
C -----
C dT >> Tmax >> Xopt >> Copt >
  1.E-3.1666667 60.00 60.00
  720      1      1      1      1      1      0      0      1      0
C      1      2      3      4      5      6      7      8
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
/BRANCH
C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< L >< C >
C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< A >< B ><Leng><><>0
C Dados das linhas.....
1 x0135Ax0001A      .290 1.92
2 x0135Bx0001B      .196 .530      .290 1.92
3 x0135Cx0001C      .196 .530      .196 .530      .290 1.92
1 x0001Ax0002A      .384 .865
2 x0001Bx0002B      .053 .430      .384 .865
3 x0001Cx0002C      .053 .404      .053 .482      .384 .865
1 x0002Ax0003A      .054 .050
2 x0002Bx0003B      .003 .024      .054 .050
3 x0002Cx0003C      .003 .022      .003 .027      .054 .050
C Dados das cargas.....
x0003A      3893.41658.6      0
x0003B      3893.41658.6      0
x0003C      3893.41658.6      0
x0005A      2336.1 995.2      0
x0005B      2336.1 995.2      0
x0005C      2336.1 995.2      0
x0006A      2336.1 995.2      0
x0006B      2336.1 995.2      0
x0006C      2336.1 995.2      0
/SOURCE
C < n 1><>< Ampl. >< Freq. ><Phase/TO>< A1 >< T1 >< TSTART >< TSTOP >
14X0135A00 11267.653 60.00 .00      A1 >< T1 >< TSTART >< TSTOP >
14X0135B00 11267.653 60.00 -120.00      -1. 1.
14X0135C00 11267.653 60.00 120.00      -1. 1.
/INITIAL
/OUTPUT
X0002A0002B0002C
BLANK BRANCH
BLANK SWITCH
BLANK SOURCE
BLANK INITIAL
BLANK OUTPUT
BLANK PLOT
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK

```



```

BEGIN NEW DATA CASE
C -----
C Arquivo de dados para simulação da falta
C -----
C dT >< Tmax >< Xopt >< Copt >
  1.E-3.1666667 60.00 60.00
  720 1 1 1 1 1 0 0 1 0
C 1 2 3 4 5 6 7 8
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
/BRANCH
C Dados das linhas.....
1 x0135Ax0001A .290 1.92
2 x0135Bx0001B .196 .530 .290 1.92
3 x0135Cx0001C .196 .530 .196 .530 .290 1.92
1 x0001Ax0002A .384 .865
2 x0001Bx0002B .053 .430 .384 .865
3 x0001Cx0002C .053 .404 .053 .482 .384 .865
1 x0002Ax0003A .054 .050
2 x0002Bx0003B .003 .024 .054 .050
3 x0002Cx0003C .003 .022 .003 .027 .054 .050
C Falta com resistência de 5 Ohms
  XX0136 5.00 0
C Dados das cargas.....
x0003A 3893.41658.6 0
x0003B 3893.41658.6 0
x0003C 3893.41658.6 0
x0005A 2336.1 995.2 0
x0005B 2336.1 995.2 0
x0005C 2336.1 995.2 0
x0006A 2336.1 995.2 0
x0006B 2336.1 995.2 0
x0006C 2336.1 995.2 0
/SWITCH
C < n 1>< n 2>< Tclose ><Top/Tde >< Ie ><VF/CLOP >< type >
C Falta Fase-Terra no nó 48
  X0048AXX0136 MEASURING 1
/SOURCE
C < n 1><>< Ampl. >< Freq. ><Phase/TO>< A1 >< T1 >< TSTART >< TSTOP >
14X0135A00 11267.653 60.00 .00 -1. 1.
14X0135B00 11267.653 60.00 -120.00 -1. 1.
14X0135C00 11267.653 60.00 120.00 -1. 1.
/INITIAL
/OUTPUT
  X0002A0002B0002C
BLANK BRANCH
BLANK SWITCH
BLANK SOURCE
BLANK INITIAL
BLANK OUTPUT
BLANK PLOT
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK

```

Apêndice C – Resumos dos artigos publicados

O desenvolvimento do projeto desta pesquisa até o estágio atual resultou nos seguintes trabalhos, publicados em congressos nacionais e internacionais.

1. *Localização de faltas fase-terra em alimentadores radiais de distribuição utilizando aquisição de dados esparsos sincronizados*. Apresentado no XV Congresso Brasileiro de Automática e publicado nos respectivos anais, 2004.

Resumo – A rápida e eficiente localização das faltas ocorridas nos alimentadores de distribuição, ainda hoje, é uma barreira a ser vencida pelas companhias de distribuição de energia elétrica. Faltas permanentes em alimentadores podem gerar, tanto para as distribuidoras como para os consumidores, transtornos e prejuízos de natureza econômica e social. Neste trabalho, apresenta-se uma proposta para localização de faltas fase-terra baseada em metodologias que utilizam aquisições de dados esparsos sincronizados em associação com os conceitos e técnicas de análise e modelos – circuitos elétricos desenvolvidos para sistemas de distribuição de energia elétrica. Apresentam-se resultados obtidos com testes realizados

com a metodologia desenvolvida e implementada para um alimentador de distribuição urbano real contendo 141 barras.

2. PMUs optimized allocation using a tabu search algorithm for fault location in electric power distribution system. Apresentado no IEEE/PES Latin America Transmission and Distribution Conference and Exposition e publicado nos respectivos anais, pp. 143 – 148, 2004.

Abstract – Phasor Measurement Units (PMUs) optimized allocation allows control, monitoring and accurate operation of electric power distribution systems, improving reliability and service quality. Good quality and considerable results are obtained for transmission systems using fault location techniques based on voltage measurements. Based on these techniques and performing PMUs optimized allocation it is possible to develop an electric power distribution system fault locator, which provides accurate results. The PMUs allocation problem presents combinatorial features related to devices number that can be allocated, and also probably places for allocation. Tabu search algorithm is the proposed technique to carry out PMUs allocation. This technique applied in a 141 buses real-life distribution urban feeder improved significantly the fault location results.

3. Location of single line-to-ground faults on distribution feeders using voltage measurements. Apresentado no IEEE/PES Latin America Transmission and Distribution Conference and Exposition e publicado nos respectivos anais, 2006.

Abstract – This paper proposes a dedicated algorithm for location of single line-to-ground faults in distribution systems. The proposed algorithm uses voltage and current phasors measured at the substation level, voltage magnitudes measured at some buses of the feeder, a database containing electrical, operational and topological parameters of the distribution networks, and fault simulation. Voltage measurements can be obtained using power quality devices already installed on the feeders or using voltage measurement devices dedicated for fault location. Using the proposed algorithm, likely faulted points that are located on feeder laterals geographically far from the actual faulted point are excluded from the results. Assessment of the algorithm efficiency was carried out using a 238 buses real-life distribution feeder. The results show that the proposed algorithm is robust for performing fast

and efficient fault location for sustained single line-to-ground faults requiring less than 5% of the feeder buses to be covered by voltage measurement devices.

4. Optimized placement of voltage measurement device for determining location of single line-to-ground faults on overhead electric power distribution feeders.

Apresentado no XVI Congresso Brasileiro de Automática e publicado nos respectivos anais, 2006.

Abstract – Solving the fault location problem on electric power distribution networks requires careful selection of the placement strategy for the data acquisition and signal processing instrumentation on the feeder, as well as the computational algorithms that use these data to pinpoint the actual location or an area that contains the location of the fault. This work presents a mathematical model for optimized placement of voltage measurement devices on distribution feeders for improving single line-to-ground fault location accuracy and finding the best cost-benefit return for electric utilities. Tests and results of the proposed optimization model using genetic algorithms are presented for a 238 nodes real-life distribution feeder. The results show that the proposed model is robust and suitable for performing optimized placement of voltage measurement devices for improving fault location accuracy.