



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"  
Campus de Ilha Solteira

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**“Modelo Estocástico de Programação Matemática de Alocação de Medidores de Tensão em Alimentadores Radiais de Distribuição de Energia Elétrica para Localização de Faltas e Monitoramento do Perfil de Tensão”**

**ANDRÉ DO AMARAL PENTEADO BÍSCARO**

**Orientador:** José Roberto Sanches Mantovani

Dissertação apresentada à Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – Campus de Ilha Solteira, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de Conhecimento: Automação.

Ilha Solteira – SP

Fevereiro / 2009

## FICHA CATALOGRÁFICA

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

- B621m Bíscaro, André do Amaral Penteadó.  
Modelo estocástico de programação matemática de alocação de medidores de tensão em alimentadores radiais de distribuição de energia elétrica para localização de faltas e monitoramento do perfil de tensão / André do Amaral Penteadó Bíscaro. Ilha Solteira : [s.n.], 2009.  
94 f. : il.
- Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Automação, 2009
- Orientador: José Roberto Sanches Mantovani  
Bibliografia: p. 87-90
1. Curtos-circuitos - Localização. 2. Energia elétrica - Distribuição. 3. Metaheurísticas. 4. GRASP (Sistema operacional de computador).

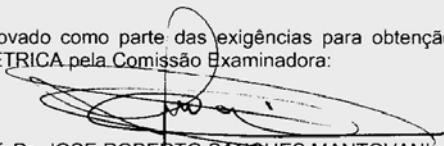
CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

**TÍTULO:** Modelo Estocástico de Programação Matemática de Alocação de Medidores de Tensão em Alimentadores Radiais de Distribuição de Energia Elétrica para Localização de Falhas e Monitoramento do Perfil de Tensão

**AUTOR:** ANDRÉ DO AMARAL PENTEADO BÍSCARO

**ORIENTADOR:** Prof. Dr. JOSE ROBERTO SANCHES MANTOVANI

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de MESTRE em ENGENHARIA ELÉTRICA pela Comissão Examinadora:

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

  
Prof. Dr. JOZUE VIEIRA FILHO  
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

  
Prof. Dr. ARTURO SUMAN BRETAS  
Departamento de Engenharia Elétrica / Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Data da realização: 18 de fevereiro de 2009.

## **Agradecimentos**

---

Agradeço a Deus pelas oportunidades e graças concedidas na vida.

A minha família pela dedicação, amor e por acreditarem em mim.

Ao professor Jose Roberto Sanches Mantovani pela confiança, competência e constante incentivo e dedicação em suas orientações durante o transcorrer desta pesquisa.

Em especial a minha amada esposa Karina pelo amor, companheirismo, afeto, dedicação e incentivo em muitos momentos difíceis.

A todos os amigos e colegas do Laboratório de Planejamento de Sistemas de Energia Elétrica – LAPSEE.

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.

A Fundação de Ensino, Pesquisa e Extensão de Ilha Solteira – FEPISA, pelo apoio financeiro através da bolsa de mestrado (processo nº 023/2007).

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ) pelo apoio financeiro através da bolsa de mestrado.

## Resumo

---

Neste trabalho é proposta uma técnica de otimização para alocar medidores dispersos de tensão em alimentadores radiais aéreos de distribuição baseada na metaheurística Greedy Randomized Adaptive Search Procedure (GRASP), com o objetivo de melhorar o desempenho de algoritmos de localização de faltas que utilizam informações esparsas de tensão e, simultaneamente, fazer o controle em tempo real do nível de tensão do alimentador operando sob diferentes cenários.

No modelo de programação proposto para alocar os medidores considera-se a natureza estocástica das variáveis envolvidas no problema relacionado com o estudo de contingências em sistemas de energia elétrica, ou seja: carregamento dos transformadores da rede no instante de ocorrência da falta, impedância de falta, probabilidade de falhas e erros de medição dos medidores dispersos de tensão, probabilidade de ocorrer qualquer um dos tipos de faltas possíveis, entre outros. O modelo da função objetivo contempla a localização de faltas com boa precisão para qualquer algoritmo que utiliza medições esparsas de tensão e os menores valores de magnitudes de tensão no alimentador, operando em condições normais ou sob contingências.

Apresentam-se resultados de testes com a metodologia proposta para dois alimentadores reais de distribuição de energia elétrica. O primeiro alimentador é de médio porte, tensão nominal de 13,8 kV e possui 134 barras. O segundo alimentador é de grande porte, tensão nominal de 11,4 kV e possui 3287 barras.

**Palavras-Chaves:** Curtos-circuitos – Distribuição - Localização de faltas – Metaheurísticas - GRASP

## Abstract

---

This work proposes an optimization technique to allocate voltage measurement devices on radial overhead electric power distribution feeders based on Greedy Randomized Adaptive Search Procedure (GRASP) metaheuristic, aiming at improving the performance of algorithms for fault location using sparse voltage information, while making the real time control of the feeder's operating voltage under different scenarios.

The proposed programming model to allocate the devices considers the nature of the stochastic variables involved in the problem with the study of contingencies in electric power systems: loading of the network transformers at time of occurrence of failure, fault impedance, probability of failures and errors of measurement of dispersed voltage devices, likelihood that any of the possible types of faults occur, among others. The model's objective function includes the faults location procedure with good precision for any algorithm that uses sparse measurements of voltage and the lowest values of the magnitudes of voltage feeder, operating under normal conditions or contingencies.

Test results with the proposed methodology applied to simulated data of two real life feeders are presented. The first feeder is medium size, rated voltage of 13.8 kV and has 134 bars. The second feeder is large, rated voltage of 11.4 kV and has 3287 bars.

**Keywords:** Short-circuit - Distribution – Fault Location - Metaheuristics - GRASP

## Lista de Figuras

---

	Pág.
<b>Figura 1.1</b> Problemas na magnitude de tensão segundo a Norma IEEE Std.1159. ....	13
<b>Figura 1.2</b> Estrutura do sistema localizador de faltas. ....	22
<b>Figura 1.3</b> Diagrama de blocos do algoritmo de localização de faltas. ....	24
<b>Figura 1.4</b> Esquema de renumeração dos nós e ramos de uma rede de distribuição. ....	35
<b>Figura 3.1</b> Estrutura de um pseudocódigo para o GRASP.....	39
<b>Figura 3.2</b> Pseudocódigo ilustrativo da fase de construção. ....	40
<b>Figura 3.3</b> Pseudocódigo ilustrativo da fase de busca local.....	42
<b>Figura 3.4</b> Algoritmo GRASP implementado em C++.....	44
<b>Figura 3.5</b> Algoritmo da função objetivo implementada em C++.....	47
<b>Figura 4.1</b> - Histograma das resistências de falta fase-terra e entre fases.....	50
<b>Figura 4.2</b> Nível de carregamento dos transformadores de distribuição.....	51
<b>Figura 4.3</b> Alimentador de distribuição com alocação ótima dos medidores. ....	52
<b>Figura 4.4</b> Falta na barra 8 e provável região em falta. ....	55
<b>Figura 4.5</b> Classificação das prováveis barras em falta para uma falta na barra 8. ....	56
<b>Figura 4.6</b> Nível de tensão da fase A durante o período transitório.....	56
<b>Figura 4.7</b> Nível de tensão da fase B durante o período transitório.....	57
<b>Figura 4.8</b> Nível de tensão da fase C durante o período transitório.....	57
<b>Figura 4.9</b> Falta na barra 70 e provável região em falta. ....	58
<b>Figura 4.10</b> Classificação das prováveis barras em falta para uma falta na barra 70. ....	59
<b>Figura 4.11</b> Nível de tensão da fase A durante o período transitório.....	60
<b>Figura 4.12</b> Nível de tensão da fase B durante o período transitório.....	60

<b>Figura 4.13</b>	Nível de tensão da fase C durante o período transitório.....	61
<b>Figura 4.14</b>	Posição das barras localizadas para falta fase-terra.....	61
<b>Figura 4.15</b>	Falta na barra 118 e provável região em falta. ....	62
<b>Figura 4.16</b>	Classificação das prováveis barras sob falta para uma falta na barra 118....	63
<b>Figura 4.17</b>	Nível de tensão da fase A durante o período transitório.....	64
<b>Figura 4.18</b>	Nível de tensão da fase B durante o período transitório.....	64
<b>Figura 4.19</b>	Nível de tensão da fase C durante o período transitório.....	65
<b>Figura 4.20</b>	Posição das barras localizadas para uma falta entre as fases A e B. ....	66
<b>Figura 4.21</b>	Falta na barra 130 e provável região em falta. ....	67
<b>Figura 4.22</b>	Classificação das prováveis barras sob falta para uma falta na barra 130....	68
<b>Figura 4.23</b>	Nível de tensão da fase A durante o período transitório.....	68
<b>Figura 4.24</b>	Nível de tensão da fase B durante o período transitório.....	69
<b>Figura 4.25</b>	Nível de tensão da fase C durante o período transitório.....	69
<b>Figura 4.26</b>	Posição das barras localizadas para falta fase-terra de baixa impedância....	70
<b>Figura 4.27</b>	Nível de carregamento dos transformadores de distribuição.....	73
<b>Figura 4.28</b>	Alimentador real de distribuição com alocação ótima dos medidores. ....	75
<b>Figura 4.29</b>	Falta na barra 853 e provável região em falta. (região vermelha).....	77
<b>Figura 4.30</b>	Classificação das prováveis barras sob falta para uma falta na barra 853....	78
<b>Figura 4.31</b>	Falta na barra 2089 e provável região em falta. (região vermelha).....	79
<b>Figura 4.32</b>	Classificação das prováveis barras sob falta para uma falta na barra 2089..	80
<b>Figura 4.33</b>	Falta na barra 3058 e provável região em falta. (região vermelha).....	81
<b>Figura 4.34</b>	Classificação das prováveis barras sob falta para uma falta na barra 3058..	82
<b>Figura 4.35</b>	Falta na barra 3243 e provável região em falta. (região vermelha).....	83
<b>Figura 4.36</b>	Classificação das prováveis barras sob falta para uma falta na barra 3243..	84



## Lista de Tabelas

	Pág.
Tabela 2.1 Composição probabilística dos tipos de faltas.....	30
Tabela 2.2 Variação dos valores das resistências de falta.....	32
Tabela 2.3 Níveis de carregamentos dos transformadores de distribuição. ....	33
Tabela 4.1 Variáveis estocásticas consideradas no modelo matemático.....	50
Tabela 4.2 Resultado da alocação otimizada dos medidores de tensão. ....	51
Tabela 4.3 Alocação ótima dos medidores.....	52
Tabela 4.4 Faltas aleatórias localizadas com as alocações ótimas propostas.....	53
Tabela 4.5 Variáveis estocásticas consideradas no modelo matemático.....	72
Tabela 4.6 Resultado da alocação otimizada dos medidores de tensão. ....	73
Tabela 4.7 Alocação dos medidores.....	74
Tabela 4.8 Faltas aleatórias localizadas com as alocações ótimas propostas.....	76
Tabela A.1 Capacidade dos alimentadores vizinhos (incluindo capacidade reserva)..	91
Tabela A.2 Dados do Alimentador.....	92

# SUMÁRIO

	<b>Pág.</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
1.1 Revisão Bibliográfica.....	15
1.2 Organização do Texto.....	18
<b>2 ALOCAÇÃO DE MEDIDORES DE TENSÃO EM ALIMENTADORES RADIAIS AÉREOS DE DISTRIBUIÇÃO .....</b>	<b>20</b>
2.1 Localização de Falhas em Alimentadores Radiais de Distribuição de Energia Elétrica .....	21
2.1.1 Medidas na Saída do Alimentador .....	24
2.1.2 Medidas Esparsas no Alimentador .....	25
2.1.3 Estimativa da Potência Pré-falha na Saída do Alimentador .....	25
2.1.4 Estimativa das Potências Pré-falha dos Transformadores de Distribuição .....	25
2.1.5 Estimativa da Corrente de Falta .....	27
2.2 Obtenção do Modelo Matemático para Alocação de Medidores de Tensão .....	27
2.2.1 Número de Medidores Esparsos de Tensão .....	28
2.2.2 Barras Sujeitas a Falhas em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica .....	30
2.2.3 Falhas em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica .....	30
2.2.4 Fase em Falta .....	31
2.2.5 Resistência de Falta .....	31
2.2.6 Carregamento dos Transformadores .....	32
2.2.7 Distância Esperada Entre o Verdadeiro Local da Falta e os Possíveis Locais de Falta Apontados Por um Algoritmo de Localização de Falhas .....	34
2.2.8 Conjunto Esperado das Barras com Magnitude de Tensão Abaixo de um Valor Prestabelecido ..	35
2.2.9 Função Objetivo .....	36

<b>3</b>	<b>TÉCNICA DE SOLUÇÃO .....</b>	<b>38</b>
3.1	<b>GRASP (Greedy Randomized Adaptive Search Procedure) .....</b>	<b>39</b>
3.1.1	Fase de Construção .....	40
3.1.2	Fase de Busca Local .....	41
3.2	<b>GRASP Especializado ao Problema de Alocação Otimizada de Medidores de Tensão Para Localização de Faltas .....</b>	<b>43</b>
3.2.1	Algoritmo GRASP.....	43
3.2.2	Fase de Construção .....	45
3.2.3	Fase de Busca Local .....	46
3.2.4	Cálculo da Função Objetivo .....	46
<b>4</b>	<b>TESTES E RESULTADOS .....</b>	<b>48</b>
4.1	<b>Alimentador 1 .....</b>	<b>49</b>
4.1.1	Alocação otimizada dos medidores de tensão.....	49
4.1.2	Sistema Localizador de Faltas .....	53
	Falta na Barra 8 .....	54
	Falta na Barra 70 .....	58
	Falta na Barra 118 .....	62
	Falta na Barra 130 .....	66
4.2	<b>Alimentador 2 .....</b>	<b>71</b>
4.2.1	Alocação otimizada dos medidores de tensão.....	71
4.2.2	Sistema Localizador de Faltas .....	76
	Falta na Barra 853 .....	77
	Falta na Barra 2089 .....	78
	Falta na Barra 3058 .....	80
	Falta na Barra 3243 .....	82
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>85</b>
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>87</b>
	<b>APÊNDICE A – DADOS DO ALIMENTADOR 1.....</b>	<b>91</b>

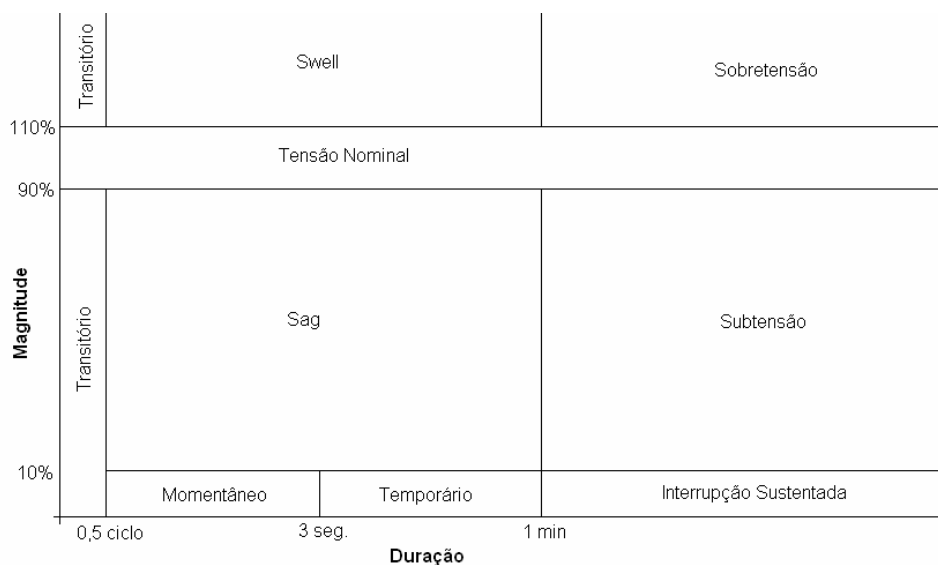
## **1 Introdução**

---

Os sistemas de energia estão sujeitos a vários tipos de problemas, tanto de natureza determinística como estocástica, que podem comprometer a qualidade do fornecimento desta energia elétrica, acarretando em prejuízos tanto para as empresas do setor elétrico como para os consumidores. Dentre estes problemas, destacam-se os relacionados com os afundamentos de tensão e os relacionados com a localização de faltas em alimentadores radiais aéreos de distribuição de energia elétrica.

Os afundamentos de tensão devidos a curtos-circuitos são reconhecidos como um importante problema com relação à qualidade de energia elétrica. A magnitude e a duração são duas características importantes dos afundamentos de tensão. A Figura 1.1 apresenta as definições da Norma IEEE Std.1159 (1995) para os problemas na magnitude das tensões, com seus respectivos tempos de duração.

A magnitude da tensão, após sofrer um afundamento devido à ocorrência de uma falta no sistema, é definida como sendo *sag*, e corresponde ao valor RMS da tensão reduzida da rede em porcentagem ou em *pu*. A duração do afundamento de tensão é o tempo que a magnitude da tensão se encontra abaixo da tensão nominal. Este tempo geralmente encontra-se entre meio ciclo e 3 segundos, segundo a Norma IEEE Std. 1159 (1995), e engloba a atuação da maioria dos equipamentos utilizados para a eliminação das faltas em sistemas de distribuição de energia elétrica.



**Figura 1.1** Problemas na magnitude de tensão segundo a Norma IEEE Std.1159. (BOLLEN, 1999, p. 22)

As reduções nas magnitudes de tensão do sistema passam a ser perturbadoras quando o valor RMS da tensão da rede cai abaixo de 90 % do valor nominal. Em particular, equipamentos eletrônicos tais como computadores, reguladores de velocidades e sistemas de controle de processos são extremamente sensíveis às variações da tensão da rede.

Outro aspecto importante está relacionado à manutenção das magnitudes das tensões do sistema de energia elétrica em regime permanente dentro dos valores estabelecidos na resolução No. 505 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Segundo esta resolução, a concessionária deve manter em arquivo eletrônico as informações relativas ao cadastro de todas as unidades consumidoras atendidas com tensão inferior a 69 kV. A ANEEL define, por meio de critério estatístico aleatório, as unidades consumidoras da amostra para fins de medição. Embora a definição das unidades consumidoras seja através de amostras aleatórias, prevendo uma melhor qualidade do serviço de fornecimento, as empresas distribuidoras podem prover o sistema elétrico de pontos de monitoramento de tensão tanto em regime permanente como em regime transitório para localização de faltas e identificação de pontos críticos de afundamentos de tensão.

A desregulamentação, a privatização e a automação das empresas do setor de distribuição de energia elétrica juntamente com as novas normas que impõem índices de qualidade a serem atendidos para o fornecimento de energia elétrica, propiciam estudos,

pesquisas e desenvolvimento de equipamentos, técnicas matemáticas, algoritmos e sistemas computacionais para detecção e localização de faltas.

Com a finalidade de manter os índices de fornecimento dentro dos padrões pré-estabelecidos e atender seus clientes com uma energia de boa qualidade, os sistemas de localização de faltas em tempo real, implantados nos centros de controle, devem ser capazes de registrar as faltas ocorridas e auxiliar os operadores do sistema na localização dessas faltas, proporcionando maior confiabilidade ao sistema. Uma vez determinado o local da falta, é acionada uma equipe de manutenção para que sejam efetuados, no menor tempo possível, os devidos reparos para que o sistema deixe de operar no estado restaurativo e volte a operar normalmente.

Na literatura encontram-se vários trabalhos relacionados com a localização de faltas em alimentadores de distribuição de energia elétrica. As propostas diferem-se basicamente quanto ao método ou técnica utilizada na localização das faltas, ao número de variáveis e à instrumentação utilizada no processo de aquisição de dados. 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. Dentre as principais dificuldades encontradas pela grande maioria das técnicas empregadas na localização de faltas estão: a topologia radial ou fracamente malhada da rede; as variações nas impedâncias da rede devido à reconfiguração; a existência ou não de co-geração no sistema; os tipos e os níveis de cargas ligadas na rede no instante de incidência da falta e que se refletem diretamente nas correntes e tensões pré-falta; as seções com condutores de diferentes bitolas e o conhecimento exato da impedância do sistema que se encontra atrás da subestação.

Uma classe de metodologias para localizar faltas em redes de distribuição de energia elétrica utiliza dados esparsos de medição de tensão (ABUR et al., 2002, LUO et. al., 2004, PEREIRA, 2007, PEREIRA et. al., 2008). Este tipo de abordagem é interessante sob os aspectos econômicos e técnicos porque os medidores instalados nos alimentadores podem ser usados com dupla finalidade, ou seja, localizar faltas e fazer o controle em tempo real das condições da magnitude de tensão em regiões preestabelecidas da rede de distribuição.

Neste trabalho propõe-se uma técnica de otimização para alocar medidores dispersos de tensão em alimentadores radiais aéreos de distribuição baseada na metaheurística GRASP (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*) (FEO et al., 1995) com o

objetivo de melhorar o desempenho de algoritmos de localização de faltas que utilizam informações esparsas de tensão e, simultaneamente, fazer o controle em tempo real do nível de tensão do alimentador operando sob diferentes cenários.

No modelo de programação proposto para alocar os medidores considera-se a natureza estocástica das variáveis envolvidas no problema relacionado com o estudo de contingências em sistemas de energia elétrica, ou seja: carregamento dos transformadores da rede no instante de ocorrência da falta, impedância de falta, probabilidade de falhas e erros de medição dos medidores dispersos de tensão, probabilidade de ocorrer qualquer um dos tipos de faltas possíveis, entre outros. O modelo da função objetivo (F. O.) contempla a localização de faltas com boa precisão para qualquer algoritmo que utiliza medições esparsas de tensão e a detecção dos menores valores de magnitudes de tensão na maior parte possível do alimentador, operando em condições normais ou sob contingências. Desta forma, obtém-se um modelo de programação não linear estocástico que é resolvido através de um algoritmo GRASP especializado na solução do problema de alocação otimizada de medidores de tensão.

Para avaliar a qualidade das configurações propostas para a alocação dos medidores de tensão no alimentador de distribuição utiliza-se um algoritmo de localização de faltas (PEREIRA et al., 2008) para alimentadores de distribuição radiais, aéreos, trifásicos, com cargas desequilibradas e que podem possuir ramais laterais trifásicos, bifásicos e monofásicos. Apresentam-se resultados de testes com a metodologia proposta para um alimentador real de distribuição de 13,8 kV e 134 barras.

## 1.1 Revisão Bibliográfica

Na literatura, encontram-se vários trabalhos relacionados com a alocação otimizada de medidores de tensão para localização de faltas em alimentadores de distribuição de energia elétrica. As propostas diferem-se basicamente quanto ao método ou técnica de otimização utilizada. A seguir serão apresentados alguns desses trabalhos.

Cho et.al. (2001) propõem um estudo sobre a alocação ótima de unidades medidoras de fasores, conhecidos como “Phasor Measurement Units” (PMUs), com receptores GPS (Global Positioning System) para um monitoramento mais rigoroso dos sistemas de potência. O problema de alocação ótima dos PMUs, também conhecido

como “Optimal PMU Placement” (OPP), é expresso como um problema de otimização combinatória submetido a restrições de observabilidade do sistema em estudo. Três abordagens são propostas visando solução do OPP. Primeiro, é proposto um algoritmo tipo simulated annealing modificado, também conhecido como “Modified Simulated Annealing” (MSA). O método convencional de simulated annealing é ligeiramente modificado na definição da temperatura inicial e no procedimento de esfriamento para considerar o estado atual do conjunto solução. Em segundo lugar, um método de combinação direta é sugerido, no qual se utiliza um método simples de regras heurísticas. Ao selecionar a solução teste e os conjuntos vizinhos, esta regra heurística é usada para selecionar os conjuntos mais eficazes no sentido da observabilidade do sistema. A última proposta é um algoritmo de busca tabu, também conhecido como “Tabu Search” (TS), em que a regra heurística usada no método de combinação direta também é utilizada para reduzir o espaço de busca. Os métodos de otimização sugeridos são aplicados para resolver o problema de alocação ótima dos PMUs nos sistemas testes IEEE 14, 30 e 57 barras.

Pereira et. al. (2004) propõem, para a solução do problema de alocação ótima de PMUs (phasor measurement units) em alimentadores de distribuição de energia elétrica, um algoritmo tipo busca tabu. Este algoritmo explora a estrutura de dados do histórico das buscas realizadas, utilizando estas informações como condição para o novo movimento no espaço de busca das soluções para o problema. Assim, ao invés de explorar aleatoriamente o espaço de busca, utiliza uma memória de curto prazo para armazenar as soluções exploradas recentemente e utiliza, também, uma memória de longo prazo para armazenar a frequência de busca em cada região. Os dados de longo prazo são utilizados como valores de penalização para o problema, com o objetivo de diversificar as buscas futuras em regiões menos visitadas. Os testes foram realizados em um alimentador real de distribuição de energia elétrica de 13,8 kV e 141 barras, considerando-se a disponibilidade de 1, 2, 3 ou 4 PMUs para serem alocados.

Dongjie et. al. (2004) apresentam uma comparação de vários métodos para alocação ótima de PMUs, com o objetivo de se fazer a estimação do estado da rede. Para a solução do problema de alocação otimizada, é utilizado inicialmente um método teórico gráfico, baseado em regras para a alocação dos PMUs. Em seguida, apresenta três metaheurísticas, sendo elas: simulated annealing, algoritmo genético e busca tabu.

Pereira et. al. (2006) propõem um modelo matemático para fazer a alocação otimizada de medidores de tensão com o objetivo de minimizar o número de medidores



usados no processo de localização das faltas e, também, minimizar os erros nas indicações de faltas do tipo fase-terra, apontados pelo algoritmo de localização de faltas. Para a solução do problema de alocação otimizada dos medidores de esparsos de tensão ao longo do alimentador é proposto um algoritmo genético dedicado para achar a solução ótima do problema. A técnica de solução é utilizada em um alimentador real de distribuição de 13,8 kV e 238 barras, considerando-se a disponibilidade de 5, 10 ou 15 medidores para serem instalados no alimentador.

Pereira (2007) apresenta um modelo matemático de programação binária para fazer a alocação otimizada de medidores esparsos de tensão ao longo do alimentador com o propósito de melhorar a precisão do algoritmo de localização de faltas desenvolvido em seu trabalho. Como a técnica de localização de faltas proposta tem a capacidade de analisar se a falta ocorreu nos pontos previamente estabelecidos, classes de precisão são estipuladas para o erro calculado entre as distâncias do verdadeiro local da falta e o ponto indicado pelo algoritmo de localização de faltas. No modelo matemático apresentado para alocar os medidores, consideram-se somente o número de medidores a serem alocados e as classes de precisão, priorizando-se, assim, as configurações que apresentem resultados com melhores classes de precisão. Para a solução do modelo matemático, é utilizado um algoritmo genético dedicado no qual a geração da população inicial é feita de forma semi-aleatória, respeitando-se o número máximo de medidores preestabelecidos e a função de adaptação é composta pela função objetivo e por um fator de penalidade que considera a violação da restrição do número máximo de medidores disponíveis. O critério de convergência é baseado no número máximo de iterações, associado a um critério de parada dependente do número de iterações nas quais não ocorreram melhorias da solução incumbente.

Souza et. al. (2008) propõem um método baseado em sistemas de inferência fuzzy para fazer a alocação de dispositivos indicadores de falta em sistemas de distribuição de energia elétrica. A alocação é feita considerando-se apenas o alimentador principal, definido através da distância entre a subestação e a barra do alimentador que se encontra distante. O sistema de inferência fuzzy é formulado para estimar os pontos potenciais de alocação dos indicadores de falta apenas no alimentador principal. Os parâmetros de entrada deste sistema são: carga instalada, número de consumidores, corrente de curto-circuito e a distância da barra candidata em relação aos dispositivos de proteção instalados na rede de distribuição, sendo este o principal parâmetro utilizado.

## 1.2 Organização do Texto

O presente trabalho foi organizado em cinco capítulos. Este primeiro é introdutório e descreve de forma geral o problema de localização de faltas em alimentadores radiais de distribuição de energia elétrica, a importância da alocação otimizada dos medidores de tensão e os objetivos deste trabalho.

O Capítulo 2 apresenta o algoritmo de localização de faltas que serviu de base para o desenvolvimento do sistema de localização de faltas em alimentadores radiais de distribuição de energia elétrica. Na concepção do sistema para localização de faltas considera-se que as medições disponíveis são somente os fasores das tensões e correntes pré e pós-falta das fases medidas na subestação e as tensões pós-falta medidas em algumas barras remotas do alimentador. Um modelo estocástico de programação matemática de alocação otimizada dos medidores de tensão é apresentado em seguida e analisam-se as principais variáveis que afetam o desempenho dos programas de localização de faltas e que são consideradas no modelo matemático proposto para alocação dos medidores de tensão, sejam elas determinísticas ou estocásticas.

O capítulo 3 descreve os conceitos básicos da metaheurística GRASP (FEO et al., 1995) e apresenta-se um algoritmo GRASP especializado na solução do problema de alocação otimizada de medidores de tensão que utiliza os conceitos da metodologia para localização de faltas proposta por Pereira (2008) e simulação de Monte Carlo (COATES, 1988), que envolve variáveis aleatórias com distribuições de probabilidade conhecidas.

O capítulo 4 apresenta os testes e resultados obtidos para a alocação otimizada dos medidores de tensão em dois alimentadores trifásicos reais de distribuição, sendo um de pequeno e outro de grande porte. O primeiro alimentador possui 134 barras e apresenta tensão nominal de 13,8 kV e o segundo alimentador possui 3287 barras com tensão nominal de 11,4 kV. Para avaliar a contribuição da metodologia proposta na melhoria do desempenho do sistema de localização de faltas comparam-se os resultados das localizações das faltas obtidos através da alocação otimizada proposta pelo modelo estocástico com os resultados obtidos através da alocação ótima proposta por Pereira et al. (2004).

No capítulo 5 discutem-se os resultados dos testes e apresentam-se algumas considerações sobre as melhorias na eficiência do algoritmo de localização de faltas com a alocação otimizada dos medidores de tensão. Comentários, propostas de melhorias do modelo matemático e trabalhos futuros também fazem parte deste capítulo.

No Apêndice A encontram-se os dados do alimentador real de distribuição de 13,8 kV e 134 barras, utilizado como referência para as simulações apresentadas neste trabalho.

## **2 Alocação de Medidores de Tensão em Alimentadores Radiais Aéreos de Distribuição**

---

A alocação otimizada de medidores de tensão está relacionada com a necessidade de monitorar os níveis da magnitude de tensão na rede e com algoritmos computacionais que empregam medições de tensão ao longo do alimentador para executar a localização de faltas. No modelo matemático para alocação de tais equipamentos nos alimentadores de distribuição considera-se como uma ferramenta auxiliar para avaliar a função de adaptação um algoritmo de localização de faltas (PEREIRA et. al., 2008). Este modelo matemático busca definir a posição onde devem ser instalados os medidores de tensão no alimentador, visando estabelecer a melhor relação custo/benefício entre os investimentos a serem feitos e obter resultados com qualidade e precisão para qualquer algoritmo de localização de faltas que utiliza informações de afundamentos de tensão para localizar faltas em redes de distribuição. Para reduzir os custos de implantação e operar com um bom nível de confiabilidade de dados e equipamentos no alimentador, procura-se através do modelo matemático utilizar uma quantidade reduzida de medidores de tensão instalados no alimentador. Esses medidores devem ser instalados em ramos que melhorem os resultados finais da localização de faltas e façam o monitoramento do nível de tensão do sistema.

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, além de fazer o controle em tempo real das condições da magnitude de tensão em regiões preestabelecidas da rede de distribuição.

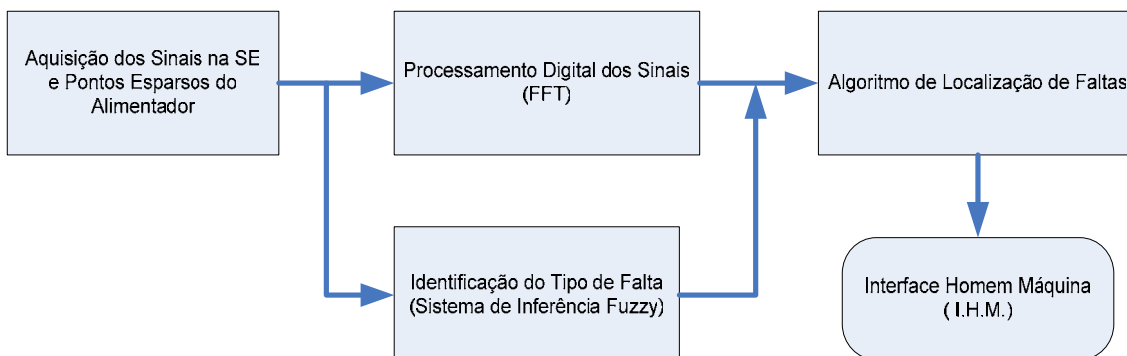
Neste capítulo é proposto um modelo matemático de otimização com variáveis estocásticas para alocação otimizada dos dispositivos de medição de tensão no alimentador. Este modelo foi desenvolvido tendo como premissas básicas a localização de faltas para alimentadores radiais aéreos com pouco ou nenhum nível de automação, o que é a realidade dos sistemas de distribuição da maioria das empresas distribuidoras existentes hoje no Brasil e que apresentam ainda, em seus sistemas, alimentadores com grande extensão rural.

## **2.1 Localização de Faltas em Alimentadores Radiais de Distribuição de Energia Elétrica**

A localização de faltas 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 ocorrência da falta.

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 e o processamento digital das medidas contribuem diretamente na eficiência, precisão e confiabilidade dos algoritmos para localização de faltas.

Na Figura 1.2 ilustra-se o sistema de localização de faltas pesquisado e melhorado durante o desenvolvimento deste trabalho. (PEREIRA et al.,2004)



**Figura 1.2** Estrutura do sistema localizador de faltas.

Este sistema é adequado para localizar qualquer tipo de falta, pois nenhuma hipótese sobre a impedância de falta é considerada na modelagem da falta empregada pelo algoritmo de localização de faltas.

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

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

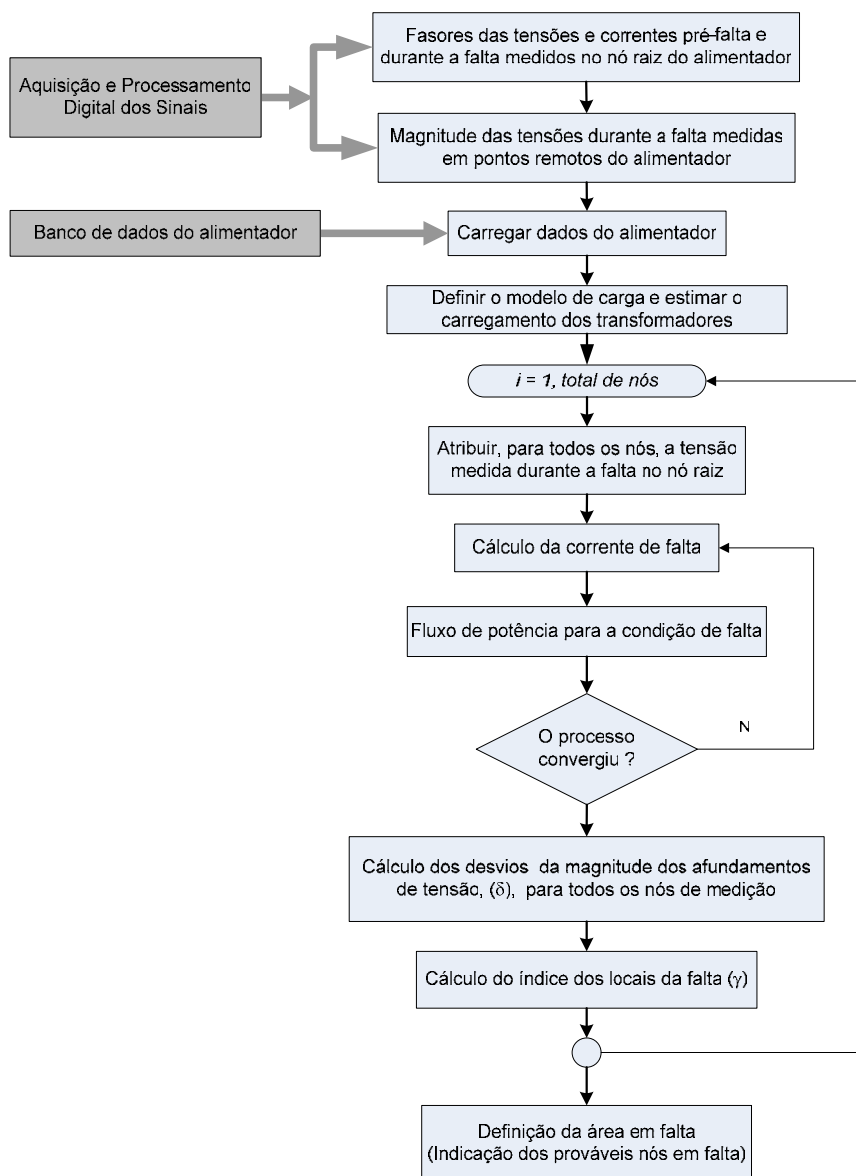
Para a identificação do tipo de falta é implementado um algoritmo baseado na metodologia proposta por Decanini (2008). Esta metodologia utiliza os sinais das correntes trifásicas medidas na saída do alimentador e, através de um sistema de inferência fuzzy, identifica o tipo e as fases envolvidas na falta.

O algoritmo selecionado para localização de faltas adotado neste trabalho é proposto por Pereira (2008), na qual a metodologia para localização de faltas em circuitos de distribuição consiste da aquisição e monitoramento de dados na saída dos alimentadores na subestação, e um conjunto de pontos mínimos necessários, alocados no alimentador para aquisição dos valores de tensão pré e pós-falta. Juntamente com os dados das medições o algoritmo necessita de uma base de dados contendo as impedâncias das seções das linhas e a potência nominal dos transformadores conectados ao alimentador.

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

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

O diagrama de blocos do algoritmo de localização de faltas está ilustrado na Figura 1.3.



**Figura 1.3** Diagrama de blocos do algoritmo de localização de faltas.

A seguir são detalhados os principais aspectos do algoritmo de localização de faltas utilizado no sistema de localização de faltas.

### 2.1.1 Medidas na Saída do Alimentador

As medidas das grandezas tensão e corrente pré e durante a falta na saída do alimentador devem ser executadas por equipamentos capazes de realizar a amostragem e armazenamento dos sinais tensão e corrente para cada alimentador. Para a obtenção dos fasores, utiliza-se a transformada rápida de Fourier (EMBREE, 1999) aplicada a janelas de amostragem de, no mínimo, um ciclo.



### 2.1.2 Medidas Esparsas no Alimentador

As medidas das tensões durante a falta, ao longo do alimentador, devem ser feitas por medidores dedicados instalados no alimentador. Canais de comunicações devem estar disponíveis para a transmissão dos dados medidos dos pontos remotos para o local de processamento do algoritmo para localização de faltas.

### 2.1.3 Estimativa da Potência Pré-falta na Saída do Alimentador

A potência pré-falta na saída do alimentador é calculada utilizando os fasores tensão e corrente trifásicos medidos na subestação (SE). Estes fasores são utilizados para calcular a potência aparente pré-falta fornecida pelo alimentador, que é usada para estimar o carregamento dos transformadores de distribuição no instante anterior à incidência da falta.. Caso as perdas no alimentador sejam significativas, elas dificultam os cálculos das correntes pré-falta devido ao fato de a potência estimada com base nos fasores tensão e corrente trifásicos medidos na SE conterem as perdas totais do alimentador. Esta potência estimada é maior do que a potência total das cargas instaladas no alimentador e os erros nesses cálculos ocasionam erros no processo de localização da falta. Este problema é contornado parcialmente através da metodologia detalhada na próxima seção, atribuindo a cada transformador da rede uma parcela desta perda, proporcional à sua capacidade.

### 2.1.4 Estimativa das Potências Pré-falta dos Transformadores de Distribuição

O carregamento de cada transformador de distribuição é estimado com base na sua potência nominal, armazenada em uma base de dados. Assim, a potência complexa pré-falta de cada transformador pode ser calculada conforme a Equação 2.1.

$$S_i = \left( \beta_i S_{nom_i} \cdot \frac{S_{SE}}{\sum_{k=1}^{nt} \beta_k S_{nom_k}} \right) \cdot [\cos(\varphi_{SE}) + j \sin(\varphi_{SE})] \quad (2.1)$$

Sendo:

$S_{nom_i}$  : potência nominal do i-ésimo transformador;

$S_{SE}$  : potência aparente estimada para a subestação;

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

$nt$ : número total de transformadores instalados no alimentador;

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

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 da tensão pré-falta medidas na saída do alimentador;
- ii. Calcular o somatório das potências nominais 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 (2.1);
- 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 e das tensões e correntes calculadas no passo v, calcular a nova potência para o nó inicial através da Equação 2.2;

$$S_{SE_{k+1}} = S_{SE_k} + [S_{SE_{med}} - V_{calc_k} \cdot (I_{calc_k})^*] \quad (2.2)$$

Sendo:

$S_{SE_{k+1}}$ : nova potência aparente estimada para a subestação;

$S_{SE_k}$ : potência aparente estimada para a subestação na iteração  $k$ ;

$S_{SE_{med}}$ : potência aparente medida na subestação;

$V_{calc_k}$ : tensão calculada no passo  $v$ ;

$I_{calc_k}$ : corrente calculada no passo  $v$ .

- viii. Recalcular as novas potências dos transformadores e retornar ao passo v até que a convergência seja obtida.

### 2.1.5 Estimativa da Corrente de Falta

A corrente de falta é estimada considerando-se que são conhecidas as tensões e correntes em todas as barras do sistema (fluxo de potência pós falta), e a corrente total medida na SE. Uma falta no sistema de distribuição é tratada como sendo uma carga conectada ao sistema. A cada iteração a corrente de falta é calculada através da Equação 2.3 sendo, então, injetada no nó sob análise.

$$I_f = I_{SE} - \sum_{i=1}^{nt} I_i \quad (2.3)$$

Sendo:

$I_{SE}$ : corrente medida no nó inicial do alimentador;

$I_i$ : corrente de carga no transformador  $i$ ;

$nt$ : número total de transformadores instalados no alimentador.

O uso dessas injeções de correntes faz com que não seja necessária nenhuma hipótese com relação à impedância de falta, já que esta não aparece na modelagem da falta.

## 2.2 Obtenção do Modelo Matemático para Alocação de Medidores de Tensão

O modelo matemático de alocação otimizada de medidores de tensão nos alimentadores de distribuição tem 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 esparsas de tensão, a qual utiliza abordagem trifásica da rede, de forma semelhante à apresentada por Pereira et al. (2008) para avaliar a função objetivo. 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.

Muitos problemas de sistemas de potência envolvem modelagens complexas e aplicação de métodos numéricos especializados para a solução desses modelos. São

muitas as variáveis envolvidas no problema de localização de faltas em alimentadores radiais de distribuição de energia elétrica e que, conseqüentemente, afetam a alocação otimizada dos medidores de tensão. Algumas destas variáveis são de natureza determinística, como por exemplo, o número de medidores disponíveis para serem alocados no alimentador e outras são de natureza estocástica, como por exemplo, a barra em falta, o valor da resistência de falta, a fase em falta, o tipo de falta e o carregamento dos transformadores.

A natureza probabilística dos problemas de alocação otimizada de medidores de tensão e localização de faltas é considerada através da Simulação de Monte Carlo, que consiste em um processo de simulação numérica aplicado a problemas que envolvem variáveis aleatórias com distribuições de probabilidade conhecidas (ou assumidas). A técnica de solução consiste em repetir o processo de simulação usando, em cada simulação, um conjunto particular de valores das variáveis aleatórias geradas de acordo com suas distribuições de probabilidade correspondentes, definidas *a priori*, onde cada solução independe das demais. O elemento chave da simulação de Monte Carlo é a seleção dos parâmetros do sistema para obter as respectivas soluções através da geração de números aleatórios por distribuições de probabilidade que descrevem as variáveis de interesse, em vez de utilizar apenas valores médios determinísticos.

A seguir serão analisadas as principais variáveis e parâmetros envolvidos nos estudos e simulações de faltas em sistemas elétricos e que são consideradas no modelo matemático proposto para alocação ótima dos medidores de tensão, sejam elas determinísticas ou estocásticas. Estas variáveis interferem direta e indiretamente nos sistemas dedicados para localização de faltas em sistemas elétricos de distribuição.

### **2.2.1 Número de Medidores Esparsos de Tensão**

O número de medidores é um fator importante para o bom desempenho dos programas de localização de faltas e monitoramento de tensão em condições normais e sob transitórios. Quanto maior o número de medidores de tensão disponíveis melhores serão os resultados obtidos (PEREIRA et al., 2004) e, dependendo dos recursos financeiros disponibilizados pelas empresas, esse número pode ser bastante limitado. Para o bom desempenho do sistema de localização de faltas necessita-se de, no mínimo, 2 equipamentos de medição. (PEREIRA et. al., 2004)

Os equipamentos de medição estão sujeitos a falhas e a erros de precisão dos transformadores de corrente e potencial, como quaisquer outros equipamentos existentes nos alimentadores de distribuição, sejam elas devido à falha no equipamento, ao ajuste de sensibilidade que não consegue identificar o afundamento de tensão como uma falta no sistema ou outro problema qualquer de operação. Sendo assim, uma probabilidade de falha dos equipamentos de medição deve ser considerada. Isto é feito através de uma distribuição de probabilidade descrita por uma função de densidade de probabilidade normal padrão, considerando-se uma probabilidade de falha de 5% para cada medidor.

A equação da função de densidade de probabilidade normal é representada pela Equação 2.4.

$$f(Z, \mu, \sigma) = \frac{100}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(Z-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (2.4)$$

Sendo:

$\mu$ : média da distribuição;

$\sigma$ : desvio padrão da distribuição;

Z: número aleatório gerado através de distribuição normal.

A função de densidade de probabilidade normal padrão é a função de densidade de probabilidade normal com média zero ( $\mu = 0$ ) e desvio padrão unitário ( $\sigma = 1$ ).

Esta equação descreve a probabilidade do medidor apresentar falha na operação ou medição, não enviando as informações necessárias para o processamento do algoritmo de localização de faltas que terá de trabalhar com um número reduzido de medidores e informações, afetando seu desempenho.

O parâmetro Z é um número aleatório gerado da transformação de Box-Muller (BOX, 1958) que consiste em um método simples e rápido de gerar números aleatórios independentes normalmente distribuídos, com média zero e desvio padrão um a partir de números aleatórios uniformemente distribuídos como apresentado na Equação 2.5.

$$Z_1 = \sqrt{-2 \ln(U_1)} \cdot \cos(2\pi U_2) \quad \text{ou} \quad Z_2 = \sqrt{-2 \ln(U_1)} \cdot \text{sen}(2\pi U_2) \quad (2.5)$$

Sendo:

$U_1$  e  $U_2$ : variáveis independentes, com valores entre [0-1], gerados por distribuição uniforme.

### 2.2.2 Barras Sujeitas a Faltas em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica

Todas as barras do alimentador estão sujeitas a algum tipo de falta, seja ela monofásica, bifásica ou trifásica. Algumas empresas possuem uma base de dados com informações sobre as regiões de maior incidência de faltas em cada alimentador, taxas de falha por km e outros dados que podem ser usados para uma análise mais realista. Porém, este não é o caso da maioria das empresas existentes no Brasil. Assim, consideram-se todas as barras como prováveis candidatas a sofrerem algum tipo de defeito, sendo esta probabilidade de falta descrita por uma função de distribuição uniforme ( $a < Barra_{falta} < b$ ), cuja densidade de probabilidade é representada pela Equação 2.6.

$$f(Barra_{falta}) = \frac{1}{b-a} \quad (2.6)$$

Sendo:

a: barra inicial;

b: barra final.

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

Os sistemas de distribuição de energia elétrica estão sujeitos a faltas que podem ser definidas como temporárias ou permanentes. As faltas temporárias são aquelas com duração limitada ao período necessário para restabelecer o serviço através da operação automática dos equipamentos de proteção. As faltas permanentes são todas as interrupções não classificadas como temporárias ou programadas. Na Tabela 2.1, apresentam-se dados estatísticos dos tipos de faltas e suas respectivas composições.

**Tabela 2.1** Composição probabilística dos tipos de faltas.

Falta	%	Permanentes (%)	Transitórias(%)
Fase-Terra	79	20	80
Fase-Fase	11	70	30
Trifásicas	2	95	5
Outros	8	-	-

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

Faltas em sistemas de distribuição de energia elétrica são normalmente provocadas pela ação de descargas atmosféricas, contatos de árvores ou animais às partes vivas do sistema, falhas de equipamento e erro humano. Estas faltas apresentam uma variação estocástica com relação à sua natureza, magnitude das correntes de curto circuito e locais de incidência.

#### **2.2.4 Fase em Falta**

Para faltas fase-terra em alimentadores de distribuição considera-se que não haja nenhuma ordem de prioridade quanto à fase em falta, ou seja, para uma falta monofásica tanto a fase A pode apresentar defeito quanto a fase B ou fase C, possuindo, assim, a mesma probabilidade de ocorrência de faltas para as três fases. Esta probabilidade de ocorrência de falta em qualquer uma das fases é descrita pela Equação 2.6.

As faltas bifásicas também são representadas por uma distribuição uniforme, assim, tanto podem ocorrer faltas entre as fases A e B, entre as fases B e C ou entre as fases C e A. Estes tipos de faltas podem ocorrer com ou sem a presença de aterramento (T), assim, são definidos 6 tipos diferentes para as faltas bifásicas, sendo 3 faltas entre fases (AB, BC ou CA) e 3 faltas bifásicas a terra (ABT, BCT ou CAT). As faltas trifásicas ocorrem com ou sem aterramento, sendo definidos dois tipos de faltas trifásicas (ABC ou ABCT).

#### **2.2.5 Resistência de Falta**

O valor da resistência de falta pode ser particularmente alto para falta fase-terra, que representam a maioria das faltas em redes aéreas de distribuição de energia elétrica, o que pode prejudicar diretamente na identificação da falta. A técnica de solução proposta por Pereira (2008) considera seu valor como um dado intrínseco ao problema, não dependendo diretamente da resistência para a localização da falta. Porém, para as simulações dos sinais de tensão e corrente das faltas, realizadas através do software (ATP), seu valor é importante, pois exerce forte influência nos valores das correntes de curto-circuito trifásicas. Tanto os valores das resistências de falta fase-terra quanto às resistências entre fases podem ser obtidas através da Equação 2.7.

$$(R_{ft}, R_{ff}) = \mu \pm Z * \sigma \quad (2.7)$$

Sendo:

$\mu$  : média dos valores das resistências;

$\sigma$  : desvio padrão;

$Z$  : número aleatório gerado através de distribuição normal.

Na Tabela 2.2 apresentam-se as faixas de valores que as resistências de falta fase-terra e fase-fase podem assumir nas simulações, com suas respectivas médias e desvios padrões.

**Tabela 2.2** Variação dos valores das resistências de falta.

Resistência	Média	Desvio Padrão	Variação
Fase-Terra	25	4,8544	$10 \leq R_{ft} < 40 \ \Omega$
Fase-Fase	0,5	0,1294	$0,1 < R_{ff} < 0,9 \ \Omega$

## 2.2.6 Carregamento dos Transformadores

Calcular o valor exato de carregamento dos transformadores não é uma tarefa simples de ser realizada. O algoritmo para localização de faltas estima o carregamento de cada transformador baseado na potência complexa medida no nó inicial do alimentador e da potência nominal de cada transformador, como apresentado na Subseção 2.1.4. Porém, os carregamentos reais dos transformadores de distribuição apresentam comportamento estocástico devido às necessidades de cada consumidor, fazendo com que os vários transformadores instalados no alimentador estejam com carregamentos diferentes de seus valores nominais quando uma falta ocorre.

Com o propósito de tornar as simulações o mais próximo da realidade, durante as simulações das faltas através do software ATP, os carregamentos dos transformadores foram gerados considerando-se um carregamento aleatório para cada transformador. Para essa finalidade, uma variável aleatória  $\varepsilon$  de distribuição normal foi selecionada. Assim, a potência complexa de cada transformador utilizada nas simulações das faltas no software ATP é dada pela Equação 2.8.



$$S_{ATP_i} = \varepsilon_i \cdot S_{nom_i} \cdot (\cos \varphi + j \text{sen } \varphi) \quad (2.8)$$

Sendo:

$\varepsilon_i$ : variável aleatória de distribuição normal;

$S_{nom_i}$ : potência nominal do i-ésimo transformador;

$\cos \varphi$ : fator de potência estimado para a subestação.

Outro fator importante que exerce grande influência no nível de carregamento dos transformadores é o cenário de operação da rede, pois, dependendo do instante que a falta ocorre no sistema, este pode estar operando com nível de carregamento baixo, médio ou alto.

Quando uma falta ocorre durante a madrugada o sistema está trabalhando com folga e apresenta baixo nível de carregamento em seus transformadores. Durante o dia muitos equipamentos são conectados à rede, exigindo maior demanda de potência ativa, podendo-se considerar, para este período, um nível de carregamento médio para os transformadores de distribuição. (PRODIST, 2008)

O pior caso ocorre no horário de coincidência de consumo da maior parte da população, que provoca um pico de consumo, denominado "horário de ponta de carga" (PRODIST, 2008). Este período varia das 18h às 21h, podendo apresentar transformadores sobrecarregados no sistema, portanto, considera-se um nível de carregamento alto para os transformadores de distribuição. Assim, para estas condições, a variável aleatória  $\varepsilon$  de distribuição normal utilizada na Equação 2.8 é definida para os três períodos distintos, conforme Tabela 2.3.

**Tabela 2.3** Níveis de carregamentos dos transformadores de distribuição.

Nível de Carregamento	Média	Desvio Padrão	Variação
Baixo	0,6	0,06473	$0,4 \leq \varepsilon < 0,8$
Médio	0,8	0,06473	$0,6 < \varepsilon < 1,0$
Alto	1,0	0,06473	$0,8 < \varepsilon < 1,2$

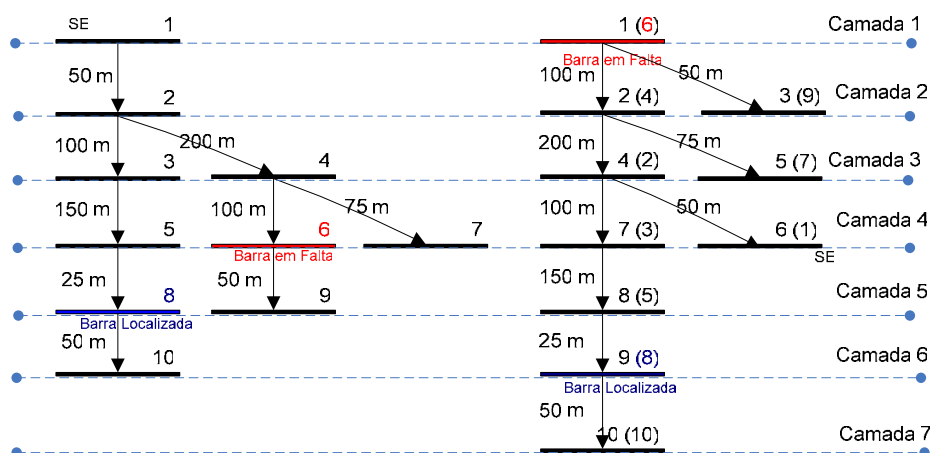
### **2.2.7 Distância Esperada Entre o Verdadeiro Local da Falta e os Possíveis Locais de Falta Apontados Por um Algoritmo de Localização de Faltas**

Os métodos de cálculo de fluxo de potência trifásico tipo varredura utilizam uma ordenação das seções em camadas, sendo a primeira delas o nó raiz do alimentador. Em cada camada, a numeração dos nós iniciais dos ramos sempre será menor do que os nós finais e os ramos da camada superior têm uma numeração menor que da camada inferior, conforme pode ser visto na Figura 1.4 (a).

No processo de simulação de faltas aleatórias usado para avaliar a função objetivo do modelo de alocação de medidores, tem-se, para cada falta simulada, uma barra em falta, usada como referência para o cálculo da distância esperada entre o verdadeiro local da falta e os possíveis locais de falta apontados por um algoritmo de localização de faltas. Os algoritmos de localização de faltas são utilizados para identificar as prováveis barras em falta ou as possíveis regiões em falta, fornecendo uma lista de barras candidatas.

Alguns autores consideram a distância entre o verdadeiro local da falta e o local apontado pelo algoritmo de localização de faltas como sendo a diferença das distâncias entre a subestação (SE) à barra em falta e da SE à barra indicada pelo algoritmo de localização de faltas (PEREIRA, 2007). No exemplo da Figura 1.4 (a), esta distância seria 25 metros, o que não condiz com a realidade. Essa mesma ordenação das seções em camadas pode ser utilizada para o cálculo da distância entre o verdadeiro local da falta e o local apontado pelo algoritmo de localização de faltas através de um processo simples de renumeração de barras na qual se considera, como barra inicial, a barra em falta simulada. Com isso obtém-se uma rede renumerada, iniciando-se da barra em falta simulada e, em cada camada, a numeração dos nós iniciais dos ramos será menor do que os nós finais e os ramos da camada superior terão uma numeração menor que da camada inferior, conforme Figura 1.4 (b).

Para a rede de distribuição renumerada, a distância entre o verdadeiro local da falta e o local apontado pelo algoritmo de localização de faltas é de 575 metros, como pode ser visto na Figura 1.4 (b). Este valor representa uma diferença muito grande em relação à distância encontrada considerando-se a diferença das distâncias entre a subestação (SE) à barra em falta e da SE à barra indicada pelo algoritmo de localização de faltas. Este esquema de renumeração usado para avaliar a função objetivo do modelo de localização de faltas



(a) Rede disposta em camadas. (b) Rede renumerada.

**Figura 1.4** Esquema de renumeração dos nós e ramos de uma rede de distribuição.

Portanto, a distância total da região em falta pode ser calculada através da somatória das distâncias entre o verdadeiro local da falta e as  $np$  primeiras barras indicadas pelo algoritmo de localização de faltas como prováveis barras em falta. Repetindo-se este procedimento para as  $nf$  faltas aplicadas ao sistema, obtém-se o valor da distância esperada entre o local verdadeiro da falta e os possíveis locais de falta apontados por um algoritmo de localização de faltas, conforme Equação 2.9.

$$E(dpfl(Barra_{falta}, Fase_{falta}, R_{ft}, R_{ff})) = \sum_{j=1}^{nf} \left[ \sum_{i=1}^{np} dpf_{-} pl_{k,i} \right] \quad (2.9)$$

Sendo:

$nf$ : número de faltas consideradas para o cálculo da F.O;

$np$ : número de barras consideradas para soma das distâncias;

$dpf_{-} pl_{k,i}$ : distância entre a barra em falta  $k$  e localizada na posição  $j$ .

### 2.2.8 Conjunto Esperado das Barras com Magnitude de Tensão Abaixo de um Valor Prestabelecido

Tendo em vista que os afundamentos de tensão devido à faltas propagam-se nas redes de distribuição apresentando características diferentes para cada ponto do alimentador, pode-se utilizar esta informação para fazer o controle em tempo real das condições da magnitude de tensão em regiões prestabelecidas da rede de distribuição,

onde estão instalados os medidores de tensão. Assim, melhoram-se os índices de qualidade e de fornecimento de energia elétrica, além de verificar se as magnitudes das tensões do sistema de energia elétrica, operando em regime permanente, estão dentro dos valores estabelecidos na resolução No. 505 da ANEEL.

Para um valor pré-determinado de afundamento de tensão  $\varepsilon_V$ , o conjunto esperado das barras com magnitude de tensão abaixo de um valor preestabelecido para falta na barra  $k$  é dado pelo somatório das  $b_i$  barras do sistema cujas tensões calculadas  $V_{cal}^{ik}$  sejam menores que tal afundamento, como pode ser observado na Equação 2.10.

$$E(nb_k(\text{Barra}_{falta}, \text{Fase}_{falta}, R_{ft}, R_{ff})) = \sum_{j=1}^{nf} \sum_{i=1}^{NB} b_i, \quad \begin{cases} b_i = 1,0 & \text{se } V_{calc_{k,i}} \leq (1 - \varepsilon_V) \cdot V_{nom_{fase}} \\ b_i = 0,0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (2.10)$$

Sendo:

$nf$ : número de faltas consideradas para o calculo da função objetivo;

$NB$ : número de barras do alimentador;

$V_{calc_{k,i}}$ : tensão na barra  $i$  calculada para uma falta na barra  $k$ ;

$\varepsilon_V$ : porcentagem de queda de tensão preestabelecida;

$V_{nom_{fase}}$ : tensão nominal de fase.

## 2.2.9 Função Objetivo

A função objetivo (F. O.) visa reduzir o erro na distância entre o verdadeiro local da falta e a indicação dada pelo algoritmo de localização de faltas bem como obter o maior número possível de barras que apresentem uma queda de tensão acima de valores preestabelecidos. Assim, garante-se a máxima sensibilidade para a configuração de medidores sob análise, além de permitir que o nível de tensão da rede de distribuição seja monitorado.

Outro fator importante a ser considerado é o número de medidores de tensão empregados na localização de faltas, pois este depende diretamente da quantidade de recursos financeiros disponibilizados pela empresa. No modelo matemático desenvolvido neste trabalho os custos fixos devido à alocação destes medidores não são considerados, considerando-se apenas o número máximo de medidores a ser alocado.

A função objetivo é dada pela distância esperada entre o local verdadeiro da falta e os possíveis locais de falta apontados por um algoritmo de localização de faltas, multiplicado por um valor  $\beta$  (Equação 2.11), e o valor do conjunto esperado das barras com magnitude de tensão abaixo de um valor preestabelecido, multiplicado por um valor  $\delta$  (Equação 2.12).

O valor de  $\beta$  é dado por:

$$\beta = \frac{nf}{dist_{MAX}} \quad (2.11)$$

Sendo:

$nf$  : quantidade de faltas aplicadas ao sistema;

$dist_{MAX}$  : distância total do sistema de distribuição em análise.

O valor de  $\delta$  é dado por :

$$\delta = \frac{nf}{NB} \quad (2.12)$$

Sendo:

$nf$  : quantidade de faltas aplicadas ao sistema;

$NB$ : total de barras do sistema de distribuição em análise.

Assim, o valor da função objetivo é calculado através da Equação 2.13.

$$F. O. = NM + \frac{nf}{dist_{MAX}} \cdot E(dpfl(Barra_{falta}, Fase_{falta}, R_{ft}, R_{ff}, tf_m)) - \frac{nf}{NB} \cdot E(nb_k(Barra_{falta}, Fase_{falta}, R_{ft}, R_{ff}, tf_m)) \quad (2.13)$$

Sendo:

$NM$	: número de medidores.
$nf$	: número de faltas aplicadas ao sistema.
$dist_{max}$	: distância total do alimentador.
$E(dpfl(Barra_{falta}, Fase_{falta}, R_{ft}, R_{ff}, tf_m))$	: distância esperada entre o local verdadeiro da falta e os possíveis locais de falta apontados por um algoritmo de localização de faltas.
$NB$	: número de barras do alimentador.
$E(nb_k(Barra_{falta}, Fase_{falta}, R_{ft}, R_{ff}, tf_m))$	: conjunto esperado das barras com magnitude de tensão abaixo de um valor preestabelecido para falta na barra $k$ .

### **3 Técnica de solução**

---

Todo sistema real opera em ambientes onde a incerteza impera, principalmente quando o sistema envolve ações humanas, forças da natureza ou avaria de equipamentos. Modelos determinísticos contribuem para a compreensão do comportamento dinâmico de um sistema, mas, por não poderem lidar com essas incertezas, acabam por serem insuficientes nos processos de tomada de decisão. Recorre-se assim aos chamados “Processos Estocásticos” como uma forma de tratar quantitativamente estes fenômenos, aproveitando as características de regularidade que os modelos determinísticos apresentam para serem descritos por modelos probabilísticos.

Pode-se definir processo estocástico como um conjunto de variáveis aleatórias indexadas a uma variável (geralmente a variável tempo), sendo representado por  $\{X(t), t \in T\}$ . Estabelecendo o paralelismo com o caso determinístico, onde uma função  $f(t)$  toma valores bem definidos ao longo do tempo, um processo estocástico toma valores aleatórios ao longo do tempo, ou seja, cada estado desse processo não determina completamente qual será o seu estado seguinte.

O problema de alocação otimizada dos equipamentos de aquisição de dados para localização de faltas em alimentadores de distribuição é um problema de otimização combinatório de elevada complexidade para sistemas de grande porte. Desta forma, para a solução deste problema, é proposto neste trabalho um algoritmo tipo GRASP (FEO et al., 1995) em associação com os conceitos da metodologia para localização de faltas

proposta por Pereira (2008) e simulação de Monte Carlo (COATES, 1988) que envolve variáveis aleatórias com distribuições de probabilidade conhecidas. A seguir descrevem-se os conceitos básicos da metaheurística GRASP e apresenta-se um algoritmo especialista para a solução do problema de alocação otimizada de medidores de tensão em alimentadores radiais aéreos de distribuição..

### 3.1 GRASP (Greedy Randomized Adaptive Search Procedure)

A metaheurística GRASP (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*) consiste em um processo iterativo probabilístico, onde a cada iteração é obtida uma solução de boa qualidade para o problema de otimização sob estudo.

Cada iteração consiste de duas fases: a primeira é a fase de construção onde é criado, elemento a elemento, um conjunto que compõem uma solução para o problema, no qual cada elemento é selecionado aleatoriamente de uma lista restrita de candidatos (LRC) e adicionado ao conjunto solução. Esses passos são repetidos até que seja encontrada uma solução inicial viável que será submetida à segunda fase, que consiste em uma fase de busca local na vizinhança dessa solução, ou seja, soluções semelhantes a ela são investigadas com o objetivo de tentar obter uma melhoria na solução corrente. Na maioria das aplicações, o critério de parada é baseado no número máximo de iterações e a melhor solução entre aquelas encontradas em cada iteração é mantida como resultado do procedimento. A estrutura básica do algoritmo GRASP está ilustrada na Figura 3.1 .

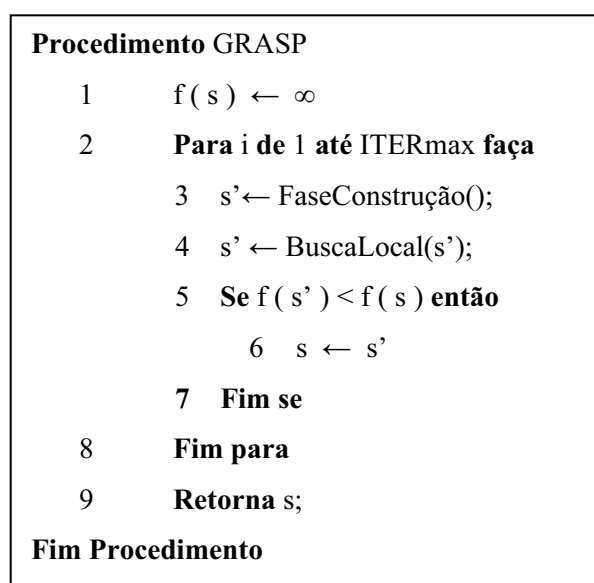


Figura 3.1 Estrutura de um pseudocódigo para o GRASP.

### 3.1.1 Fase de Construção

Na fase de construção do GRASP, uma solução viável é construída iterativamente, elemento a elemento, até que a solução esteja completa. Os elementos candidatos que compõem a solução são ordenados em uma lista, chamada de Lista de Candidatos (LC), a qual contém todos os candidatos. Esta lista é ordenada por uma função determinística que mede o benefício que o elemento escolhido mais recentemente concede à parte da solução já construída. Um subconjunto denominado lista restrita de candidatos (LRC) é formado pelos melhores elementos que compõem a lista de candidatos.

O tamanho da LRC é controlado por um parâmetro  $\alpha$ , com valores definidos no intervalo  $[0,1]$  onde, para  $\alpha = 0$ , tem-se um comportamento puramente construtivo do algoritmo e, para  $\alpha = 1$ , um comportamento totalmente aleatório. A componente probabilística do método é devida à escolha aleatória de um elemento da LRC. Este procedimento permite que diferentes soluções de boa qualidade sejam geradas a cada iteração. O pseudocódigo da fase de construção da heurística está ilustrado na Figura 3.2.

<b>Procedimento</b> FaseConstrução	
1	Sol $\leftarrow$ { }
2	<b>Enquanto</b> Sol Incompleta <b>Faça</b>
3	LRC $\leftarrow$ Constrói LRC (LC);
4	s $\leftarrow$ Seleção Aleatória ( LRC );
5	Sol $\leftarrow$ Sol U {s}
6	Atualiza Função de Adaptação
7	<b>Fim Enquanto</b>
<b>Fim Procedimento</b>	

**Figura 3.2** Pseudocódigo ilustrativo da fase de construção.

Desta forma, o principal parâmetro a ser configurado no GRASP é a cardinalidade da LRC, ou seja, a quantidade de elementos da LRC. Este parâmetro é o mais importante para o procedimento GRASP e é definido como  $|LRC|$ . Assim, se  $|LRC| = 1$ , a solução inicial é totalmente determinística e, se  $|LRC| = |LC|$ , a solução é totalmente aleatória.



A média e a variância do valor da função objetivo das soluções construídas são diretamente afetadas por tal parâmetro. Assim, se  $|LRC|$  for pequeno, menor serão a variância e o espaço de soluções percorrido e maior será a chance de aprisionar a busca local em um ótimo local. Se  $|LRC|$  é grande, maior a variância e menor a possibilidade de prisão em ótimo local, porém maiores serão a vizinhança a ser explorada e o número de iterações com soluções sub-ótimas.

A heurística é dita adaptativa porque os benefícios associados a cada elemento são atualizados a cada iteração da fase de construção para refletir as mudanças ocorridas pela seleção de elementos anteriores. A parte aleatória corresponde à forma de escolha dos melhores candidatos da lista. Cada iteração é composta por três passos:

- i. Construção da Lista Restrita de Candidatos (LRC), a qual contém um conjunto reduzido de elementos candidatos a pertencer à solução;
- ii. Escolha aleatória do elemento na LRC e inclusão deste elemento na solução;
- iii. Adaptação ou recálculo da função determinística para os elementos ainda não pertencentes à solução.

A melhor solução encontrada ao longo de todas as iterações realizadas é retornada como resultado. Para a aplicação eficaz do método é necessário, portanto, a definição de um intervalo de valores para  $|LRC|$  de forma a balancear a relação entre qualidade das soluções, quantidade de iterações necessárias e vizinhança explorada.

### **3.1.2 Fase de Busca Local**

Métodos de busca local em problemas de otimização constituem uma família de técnicas baseadas na noção de vizinhança, ou seja, são métodos que percorrem o espaço de busca das soluções do problema passando, iterativamente, de uma solução para outra que seja sua vizinha.

A fase de busca local do GRASP aproveita a solução inicial da fase de construção e explora a vizinhança ao redor desta solução. Se uma melhoria é encontrada, a solução corrente é atualizada e novamente a vizinhança ao redor da nova solução é pesquisada. O processo se repete até que nenhuma melhoria seja encontrada.

Para uma busca local eficiente é preciso ter cuidado em:

- Escolher uma vizinhança apropriada;
- Usar estruturas de dados eficientes para acelerar a busca local;
- Ter uma boa solução inicial;
- Partir de uma boa solução inicial (perto de um ótimo local) conduz-se a uma busca local eficiente.

Uma vez obtida uma solução, consulta-se a estrutura de vizinhança (  $Viz(sol)$  ) relativa a essa solução. Uma solução é dita localmente ótima se não existir nenhuma solução melhor em  $Viz(sol)$ . As soluções iniciais encontradas na fase construtiva do GRASP não são necessariamente ótimos locais. Como consequência, faz-se necessária a aplicação de um procedimento de busca local para tentar melhorar as soluções advindas da fase construtiva. Esta busca realiza sucessivas trocas da solução corrente, sempre que uma melhor solução é encontrada na vizinhança. Este procedimento termina quando nenhuma solução melhor é encontrada. O pseudocódigo da fase de busca local da heurística pode ser visto na ilustração da Figura 3.3 .

**Procedimento** Busca Local

- 1     **Enquanto** Sol Não Ótima **Faça**
- 2     Busca Melhor Solução  $t \in$  Vizinhança(s);
- 3      $s \leftarrow t$ ;
- 4     **Fim Enquanto**;

**Fim Procedimento**

**Figura 3.3** Pseudocódigo ilustrativo da fase de busca local.

O procedimento de busca local realizado de forma independente pode exigir muito tempo se a busca partir de uma solução inicial qualquer, embora se possa constatar empiricamente a melhoria de seu desempenho de acordo com a qualidade da solução inicial. O tempo gasto pela busca local pode ser reduzido através do uso de uma fase de construção que gere uma boa solução inicial.

## **3.2 GRASP Especializado ao Problema de Alocação Otimizada de Medidores de Tensão Para Localização de Faltas**

A técnica de solução proposta neste trabalho para o problema da alocação otimizada de medidores de tensão em alimentadores radiais aéreos de distribuição de energia elétrica para localização de faltas é um algoritmo GRASP. O algoritmo foi desenvolvido para explorar as características específicas do problema de localização de faltas em alimentadores radiais aéreos de distribuição a fim de obter uma maior confiabilidade dos resultados na localização das faltas e melhoria na eficiência computacional. A seguir serão apresentadas as principais características do algoritmo GRASP proposto neste trabalho.

### **3.2.1 Algoritmo GRASP**

O algoritmo GRASP desenvolvido neste trabalho realiza um processo iterativo probabilístico no qual cada iteração consiste em duas fases distintas: construção e busca local.

Na fase de construção é criado um conjunto de elementos, no qual um elemento é selecionado aleatoriamente em uma lista restrita de candidatos e adicionado ao conjunto solução. Cada vez que um elemento é adicionado ao conjunto solução, calcula-se o valor da função objetivo desta nova configuração, armazenando a melhor solução (MS), até que a solução atual (SA) esteja completa. Passa-se então para a segunda fase, que consiste em uma fase de busca local na vizinhança dessa solução atual, ou seja, soluções semelhantes a ela são investigadas com o objetivo de tentar obter uma melhoria na solução corrente. O critério de parada para o algoritmo é baseado no número máximo de iterações (ITERmax) e a melhor solução entre aquelas encontradas em cada iteração é mantida como resultado do procedimento. O algoritmo GRASP foi implementado em linguagem de programação C++ e está ilustrado no diagrama da Figura 3.4 . As fases de construção e de busca local, bem como o cálculo da função objetivo são detalhadas a seguir.

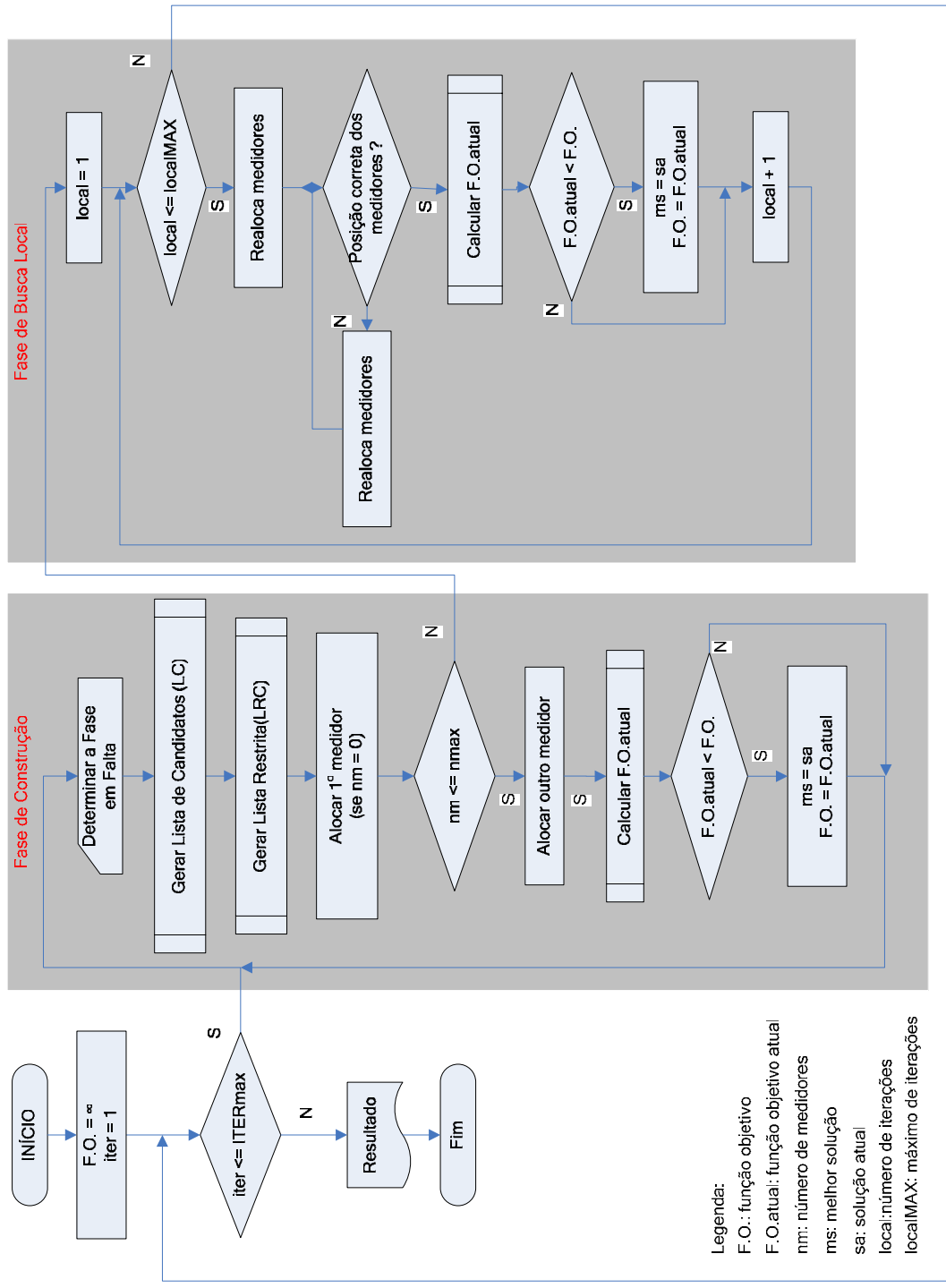


Figura 3.4 Algoritmo GRASP implementado em C++.

### 3.2.2 Fase de Construção

A fase de construção é composta inicialmente pela simulação de uma falta aleatória na rede de distribuição. Em seguida processa-se um programa de cálculo de fluxo de potência trifásico para a rede, considerando-se a presença desta falta no sistema, e classificam-se as barras em ordem decrescente de afundamento de tensão. Assim, as barras com maior queda de tensão são classificadas com maior prioridade.

Para uma falta bifásica a classificação é feita levando-se em consideração as duas fases em falta, conforme a Equação 3.1.

$$\text{Min} \{ VF_1[i], VF_2[i] \} \quad (3.1)$$

Sendo:

i: barra em falta;

$VF_1$ : valor da tensão na fase 1 em falta;

$VF_2$ : valor da tensão na fase 2 em falta.

Para uma falta trifásica a classificação é feita levando-se em consideração as três fases em falta conforme Equação 3.2, a seguir:

$$\text{Min} \{ VF_A[i], VF_B[i], VF_C[i] \} \quad (3.2)$$

Após a classificação das barras em ordem decrescente de afundamento de tensão gera-se a lista de candidatos (LC), contendo todas as barras candidatas a fazer parte da solução atual (SA) do problema, excluindo-se as barras já alocadas na SA. Em seguida gera-se a lista restrita de candidatos (LRC) contendo as n primeiras barras da lista de candidatos (LC) criada anteriormente. O tamanho da LRC é controlado por um parâmetro de controle  $\alpha$ , que pode variar entre [0-1], conforme definido na Equação 3.3.

$$|LRC| = 1 + \alpha * ( |LC| - 1 ) \quad (3.3)$$

Sendo:

|LRC| : número de elementos da lista restrita de candidatos;

|LC| : : número de elementos da lista de candidatos;

$\alpha$  : parâmetro de controle da LRC com valores definidos no intervalo [0,1].

Se  $\alpha = 0$  o algoritmo é totalmente determinístico, visto que só existe um único elemento na LRC e será possível a escolha desta única barra a ser incluída na solução em construção. Por outro lado, se  $\alpha = 1$ , a LRC conterà todos os elementos da LC, sendo estas iguais, o que tornará o algoritmo totalmente aleatório na escolha das barras candidatas a receberem os equipamentos de medição.

A partir da LRC escolhe-se aleatoriamente um elemento para fazer parte da solução atual (SA) e calcula-se o valor da função objetivo para a SA. Este processo se repete até que a SA esteja completa, contendo o número máximo de medidores (nmax). Passe-se então para a fase de busca local, conforme pode ser visto na Figura 3.4 .

### **3.2.3 Fase de Busca Local**

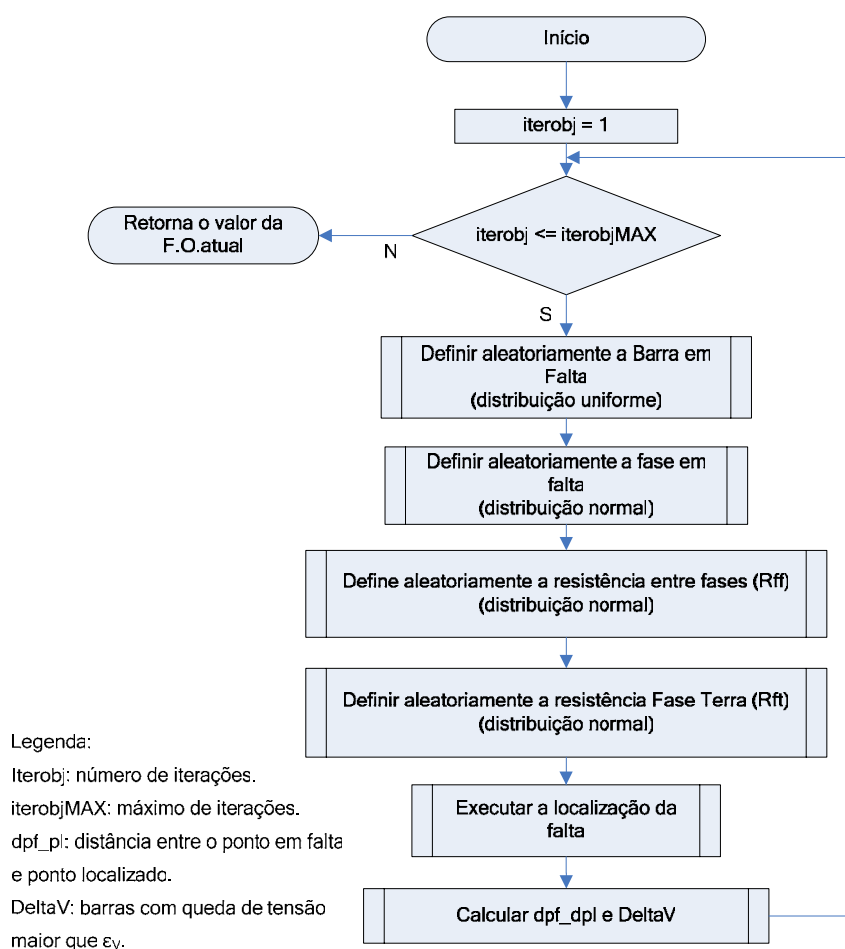
Na fase de busca local do GRASP aproveita-se a solução inicial da fase de construção e explora-se a vizinhança ao redor desta solução. Para cada medidor alocado no sistema é realizado um deslocamento aleatório entre as 4 barras adjacentes a ele, sendo 2 para a direita ou duas para a esquerda ou nenhuma alteração de posição do medidor é realizada. Cada vez que a posição dos medidores é alterada realiza-se uma verificação da posição correta desses medidores a fim de identificar se algum deles ocupará o local de outro medidor já posicionado no sistema ou em alguma posição não permitida. Caso ocorra algum problema, o medidor posicionado incorretamente é realocado, verificando-se novamente sua posição.

Depois de realizadas as devidas alterações de posições dos medidores a função objetivo é calculada e, se alguma melhoria é encontrada, armazena-se a melhor solução, atualiza-se a solução corrente e novamente explora-se a vizinhança ao redor da nova solução. Este processo se repete até que um número máximo de iterações (localMAX) seja atingido, conforme pode ser visto na Figura 3.4 .

### **3.2.4 Cálculo da Função Objetivo**

A função objetivo é calculada a partir da Equação 2.13. Para a simulação das faltas escolhem-se aleatoriamente, conforme descrito na Subseção 2.2 do capítulo anterior, a barra em falta, a fase em falta, as resistências de falta fases-terra e entre fases. Em seguida, realiza-se a simulação da falta e a sua localização através do sistema de localização de faltas, considerando-se a presença de medidores alocados nas posições indicadas pela solução atual.

Com os resultados da localização fornecidos pelo sistema de localização de faltas calcula-se a distância esperada entre o local verdadeiro da falta e os possíveis locais de falta apontados pelo algoritmo de localização de faltas. Calcula-se também o conjunto esperado das barras com magnitude de tensão abaixo de um valor pré-estabelecido para falta na barra k. O processo se repete até que um número máximo de iterações (iterobjMAX) seja atingido. Este número de iterações corresponde à quantidade de faltas aplicadas ao sistema. O algoritmo da função objetivo implementado em C++ está representado na Figura 3.5 .



**Figura 3.5** Algoritmo da função objetivo implementada em C++.

O resultado da função objetivo é dado pela distância esperada entre o local verdadeiro da falta e os possíveis locais de falta apontados pelo algoritmo de localização de faltas multiplicado por um valor  $\beta$  (Equação 2.11) e o valor do conjunto esperado das barras com magnitude de tensão abaixo de um valor preestabelecido multiplicado por um valor  $\delta$  (Equação 2.12).

## 4 TESTES E RESULTADOS

---

Neste capítulo são apresentados os resultados de testes da alocação otimizada de medidores esparsos de tensão, utilizando o sistema de localização de faltas proposto.

Os testes foram realizados usando 2 alimentadores de distribuição trifásicos reais, sendo um de pequeno e outro de grande porte, definidos assim:

- 1) Alimentador 1: Alimentador de distribuição trifásico real, com 134 barras, tensão nominal de 13,8 kV e potência nominal de 7,065 MVA. A topologia deste sistema está ilustrada na Figura 4.3 e os dados elétricos da rede encontram-se no Apêndice A.
- 2) Alimentador 2: Alimentador de distribuição trifásico real, com 3287 barras e tensão nominal de 11,4 kV.

Nas simulações das faltas através do software ATP, as cargas foram modeladas como impedâncias constantes, o carregamento dos transformadores foi definido conforme Equação 2.8 da Subseção 2.2.6. No algoritmo de localização de faltas usado para testar a qualidade da alocação de medidores obtida através da metodologia proposta, as cargas foram modeladas como impedância constante, condição de carga média e o carregamento dos transformadores estimado em função das potências nominais de cada transformador.

O algoritmo para alocação otimizada dos medidores de tensão foi implementado em linguagem de programação C++.



Os resultados obtidos com os testes realizados procuram demonstrar a contribuição da metodologia proposta na melhoria do desempenho do programa de localização de faltas e na análise do nível de tensões da rede de distribuição quando ocorre uma falta.

## 4.1 Alimentador 1

Apresentam-se a seguir os resultados obtidos para a alocação ótima dos medidores esparsos de tensão para um alimentador de distribuição trifásico real, com 134 barras, tensão nominal de 13,8 kV e potência nominal de 7,065 MVA.

### 4.1.1 Alocação otimizada dos medidores de tensão

Para a solução do problema de alocação otimizada dos medidores de tensões foram consideradas as seguintes condições de teste:

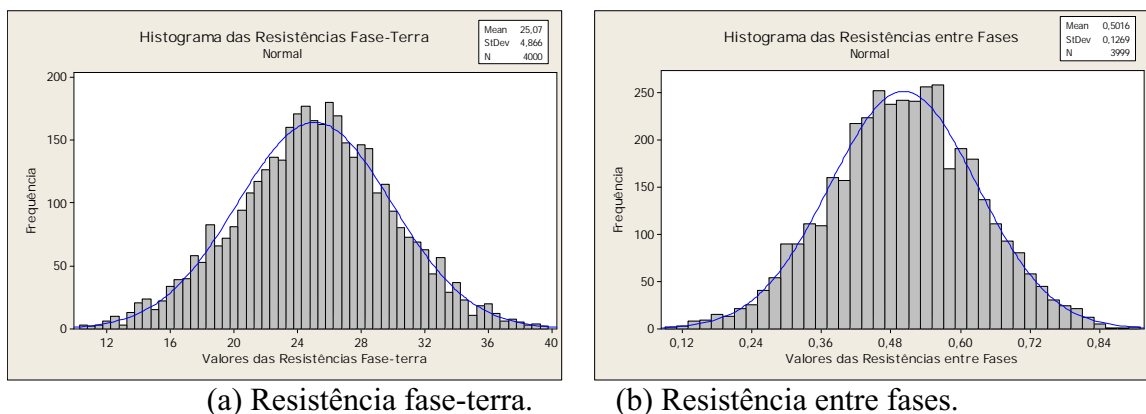
- Através de estudos preliminares verificou-se que o número máximo de medidores a serem alocados no alimentador, para o bom desempenho do algoritmo de localização de faltas, é igual a 4; (PEREIRA et al., 2004)
- As magnitudes das tensões, durante os afundamentos, passam a ser críticas quando assumem valores abaixo de 90% da tensão nominal, sendo assim, estabelece-se o limite para afundamento de tensão ( $\varepsilon_v$ ) em 10%;
- O tamanho da lista restrita de candidatos (LRC) foi limitado à metade do tamanho da lista de candidatos (LC), sendo assim, o parâmetro de controle ( $\alpha$ ) do tamanho da LRC é igual a 0,5;
- O número máximo de iterações do algoritmo GRASP especializado (ITERmax) é definido em 200;
- Para determinar a região em falta consideram-se as 20 primeiras posições indicadas pelo algoritmo de localização de faltas, portanto, o número de barras consideradas para a soma das distâncias ( $\eta_p$ ) é igual a 20;
- Quanto maior o tamanho da amostra, menor será a variância da média amostral, isto é, mais precisa será a média amostral. Se a amostra for grande (a partir de 30 elementos), pouco importará ser conhecida a variância populacional e a distribuição normal poderá ser usada nas análises estatísticas do problema. Assim, o número de faltas aplicadas ao sistema (iterobjMAX) para o cálculo da função objetivo é igual a 30;

- Na fase de busca local realiza-se o processo de busca na vizinhança da solução atual para cinco vizinhos escolhidos aleatoriamente, portanto, o número de iterações na fase de busca local é definido em 5;
- O nível de carregamento dos transformadores, nas simulações das faltas através do software ATP, é definido de acordo com a variação apresentada na Tabela 2.3;
- As resistências de falta fase-terra e entre fases, a barra em falta, a fase em falta e a taxa de falha dos medidores são consideradas variáveis estocásticas, conforme definido na Tabela 4.1.

**Tabela 4.1** Variáveis estocásticas consideradas no modelo matemático.

Variável	Distribuição	Média	Desvio Padrão	Faixa de Variação
<b>Barra Falta</b>	<b>Uniforme</b>	-	-	$3 \leq \text{Barra}_f < 136$
<b><math>R_{ff}</math></b>	<b>Normal</b>	<b>0,5</b>	<b>0,1294</b>	$0,1 < R_{ff} < 0,9 \Omega$
<b><math>R_{ft}</math></b>	<b>Normal</b>	<b>25</b>	<b>4,8544</b>	$10 < R_{ft} < 40 \Omega$
<b>Fase Falta</b>	<b>Normal</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	$0 < f(Z, \mu, \sigma) \leq 10 \rightarrow$ falta $3\phi$ $10 < f(Z, \mu, \sigma) \leq 40 \rightarrow$ falta $2\phi$ $f(Z, \mu, \sigma) > 40 \rightarrow$ falta $1\phi$
<b>Taxa de Falha dos medidores</b>	<b>Normal</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	$f(Z, \mu, \sigma) \leq 5 \rightarrow$ falha do medidor

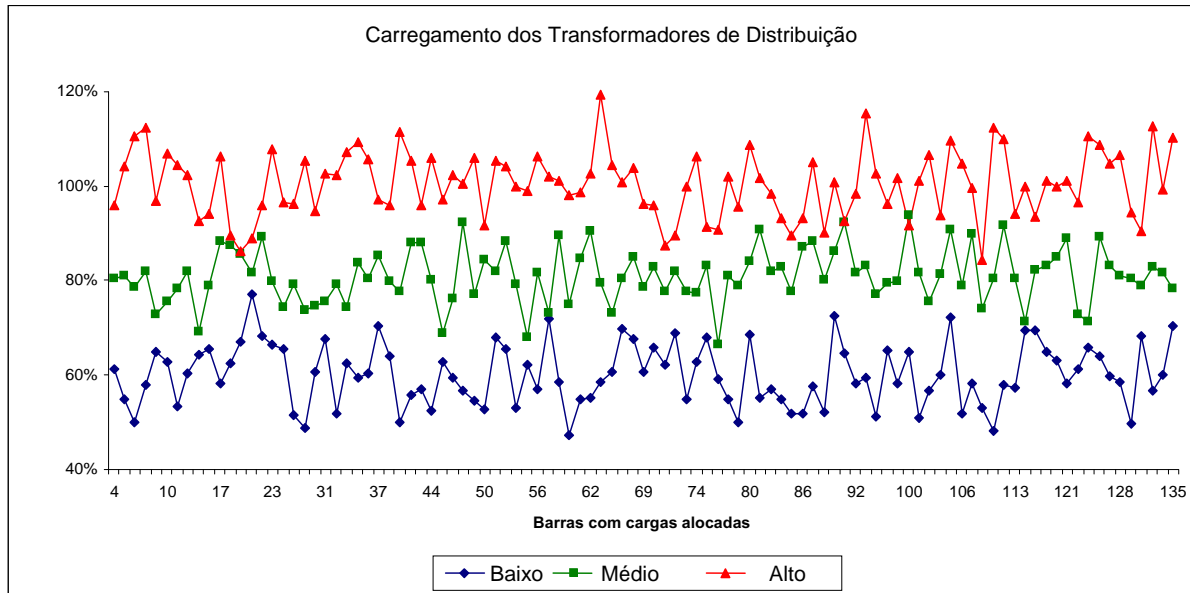
Na Figura 4.1 (a) estão representados alguns valores das resistências de falta fase-terra e na Figura 4.1 (b) alguns valores das resistências de falta entre fases que foram utilizadas nas simulações das faltas no software ATP, sendo geradas por distribuição normal, conforme Tabela 4.1.



**Figura 4.1** - Histograma das resistências de falta fase-terra e entre fases.

Os carregamentos dos transformadores simulados no ATP foram executados considerando um carregamento aleatório para cada transformador, de acordo com a equação 2.8. Para essa

finalidade, uma variável aleatória  $\varepsilon$  com distribuição normal foi selecionada, conforme Tabela 2.3. Uma amostra dos níveis de carregamento dos transformadores gerados para as simulações das faltas no software ATP estão representadas na Figura 4.2 .



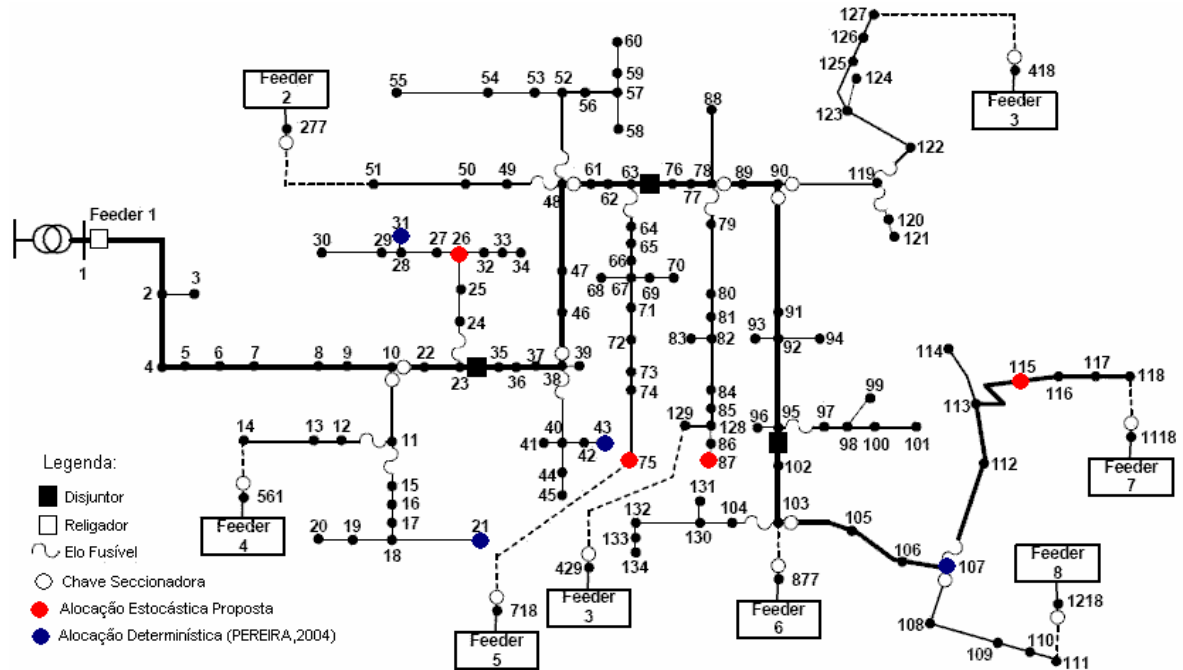
**Figura 4.2** Nível de carregamento dos transformadores de distribuição.

O algoritmo GRASP especializado na alocação otimizada dos medidores de tensão forneceu as posições ótimas apresentadas na Tabela 4.2.

**Tabela 4.2** Resultado da alocação otimizada dos medidores de tensão.

<b>Posição dos Medidores</b>
26 , 75 , 87 , 115

O diagrama unifilar do alimentador de distribuição com os pontos de alocação ótima dos medidores encontrados através da metodologia proposta está representado na Figura 4.3 . Apresenta-se também a alocação ótima proposta por Pereira et al. (2004).



**Figura 4.3** Alimentador de distribuição com alocação ótima dos medidores.

Para a configuração de medidores proposta neste trabalho e a configuração proposta por Pereira et al.(2004) foram calculados os valores das funções objetivo, considerando-se as seguintes condições testes:

- O número de faltas aplicadas ao sistema para o cálculo da função objetivo é 100;
- O limite para afundamento de tensão ( $\epsilon_v$ ) é estabelecido em 10%;
- Para determinar a região em falta consideram-se as 20 primeiras posições indicadas pelo algoritmo de localização de faltas, portanto, o número de barras consideradas para a soma das distâncias ( $np$ ) é igual a 20;
- As resistências de falta fase-terra e fase-fase, a barra em falta, a fase em falta e a taxa de falha dos medidores são consideradas variáveis estocásticas, conforme definido na Tabela 4.1;

A alocação ótima dos medidores de tensão através do modelo determinístico proposto por Pereira et al. (2004) e a alocação ótima encontrada pela modelo probabilístico proposto neste trabalho estão representadas na Tabela 4.3.

**Tabela 4.3** Alocação ótima dos medidores.

Proposta	Posição dos Medidores
Modelo Estocástico Proposto	26, 75, 87, 115
Modelo Determinístico (PEREIRA et al., 2004)	21, 31, 43, 107

O valor da função objetivo encontrado para a alocação ótima dos medidores de tensão pelo modelo estocástico proposto neste trabalho é bem melhor que o valor da função objetivo encontrado para a alocação ótima proposta por Pereira et al. (2004), no qual foi utilizado um modelo determinístico para realizar a alocação ótima dos medidores de tensão. Para demonstrar a real melhoria no sistema de localização de faltas são apresentados a seguir alguns testes onde se comparam os resultados das localizações de faltas obtidas através das duas configurações de medidores propostas na Tabela 4.3.

#### 4.1.2 Sistema Localizador de Faltas

Para avaliar as melhorias no desempenho do sistema de localização de faltas com a alocação otimizada dos medidores de tensão definida pela técnica proposta foram realizadas diversas simulações, sob diferentes condições de testes e cenários de operação. A Tabela 4.4 apresenta os resultados de algumas faltas aleatórias simuladas e localizadas pelo sistema de localização de faltas.

**Tabela 4.4** Faltas aleatórias localizadas com as alocações ótimas propostas.

Número de Faltas	Fase Falta	Resistências		Barra em Falta	Alocação Otimizada			PEREIRA et al. 2004		
		Fase Terra	Entre Fases		Posição Classificada	$\sum dpf_{pl}$ (10 primeiras)	$\sum Barras$ ( $\Delta V < 0,90$ )	Posição Classificada	$\sum dpf_{pl}$ (10 primeiras)	$\sum Barras$ ( $\Delta V < 0,90$ )
1	A	25,935	0,421	83	1	810	4	9	1700	4
2	<b>B</b>	<b>13,067</b>	<b>0,466</b>	<b>130</b>	<b>3</b>	<b>2040</b>	<b>133</b>	<b>17</b>	<b>9740</b>	<b>133</b>
3	ABCT	24,989	0,71	119	6	1780	133	12	3770	133
4	C	19,303	0,605	31	6	1890	4	1	2220	4
5	A	25,343	0,453	16	8	2060	4	1	2250	4
6	ABT	27,38	0,629	41	4	1360	133	2	980	133
7	CAT	27,84	0,638	3	1	2740	133	1	2550	133
8	A	19,59	0,56	5	3	2570	38	3	3680	38
9	<b>A</b>	<b>28,421</b>	<b>0,417</b>	<b>70</b>	<b>2</b>	<b>590</b>	<b>127</b>	<b>9</b>	<b>860</b>	<b>127</b>
10	B	28,509	0,518	40	1	890	131	4	1540	131
11	BCT	27,085	0,614	29	6	2335	133	7	1470	133
12	B	25,798	0,321	12	14	1070	133	4	2100	133
13	CAT	24,936	0,429	25	34	3120	133	19	3210	133
14	A	14,346	0,516	81	1	1130	128	11	1820	128
15	C	20,653	0,317	86	7	1500	3	39	5950	3
16	C	19,109	0,463	42	5	1340	6	5	1095	6
17	ABC	27,524	0,554	14	19	6700	133	47	5010	133
18	A	20,679	0,676	87	1	1580	73	4	1750	73
19	<b>ABCT</b>	<b>25,138</b>	<b>0,391</b>	<b>8</b>	<b>8</b>	<b>1260</b>	<b>133</b>	<b>8</b>	<b>1380</b>	<b>133</b>
20	ABT	19,602	0,562	32	8	1810	133	2	1500	133

Continua...

21	B	19,275	0,377	103	12	3490	133	23	4780	133
22	A	24,306	0,525	64	1	1710	22	13	3540	22
23	ABT	27,65	0,481	6	16	7240	133	10	4350	133
24	C	13,064	0,255	13	3	1480	89	1	1750	89
25	B	24,733	0,542	88	12	3340	133	40	8090	133
<b>26</b>	<b>ABT</b>	<b>31,204</b>	<b>0,528</b>	<b>118</b>	<b>2</b>	<b>2630</b>	<b>133</b>	<b>10</b>	<b>2870</b>	<b>133</b>
27	A	17,006	0,442	18	11	1340	99	1	1490	99
28	BC	38,232	0,496	3	2	9370	133	2	9220	133
29	AB	26,351	0,36	86	5	1380	133	35	10160	133
30	A	18,839	0,427	75	2	1940	88	2	6520	88

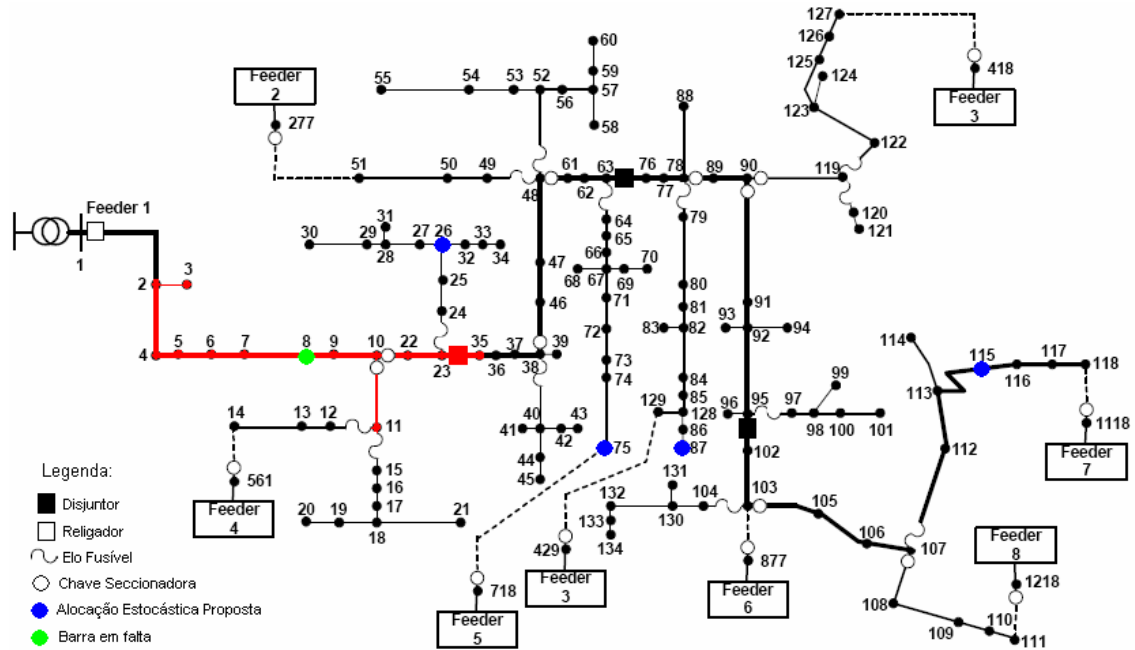
Serão apresentados os resultados para as faltas simuladas nas barras 8, 70, 119 e 130. Para as faltas em cada uma dessas barras foram geradas as formas de ondas das tensões e correntes na saída do alimentador na subestação e as formas de onda das tensões em pontos remotos do alimentador, efetuando com sucesso o processo de identificação do tipo de falta, de processamento digital dos sinais e de localização das faltas. Os resultados destes testes são apresentados a seguir, onde também se comparam os resultados das localizações de faltas obtidas através das duas configurações de medidores propostas.

### **Falta na Barra 8**

Foram consideradas as seguintes condições testes:

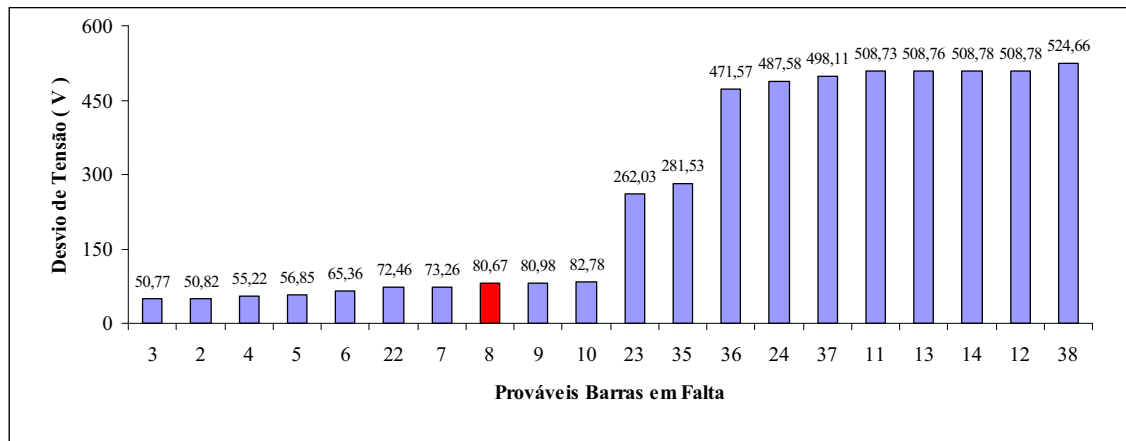
- Foi aplicada uma falta entre as fases A, B e C;
- Resistência de falta fase-terra é igual a 25,138;
- Resistência de falta entre fases é igual a 0,391.

Na Figura 4.4 ilustra-se o ponto onde foi simulada a falta (barra verde) e a região de localização da falta fornecida pelo sistema de localização de faltas utilizando a configuração ótima proposta (região das 10 primeiras barras localizadas).

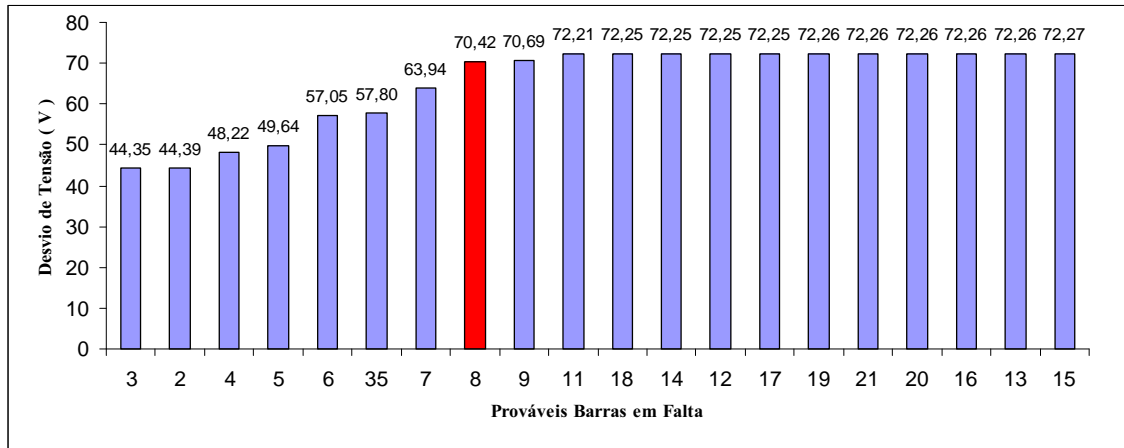


**Figura 4.4** Falta na barra 8 e provável região em falta.

Na Figura 4.5 é feita uma comparação entre os resultados obtidos pelo sistema de localização de faltas para a alocação de medidores de tensão proposta por Pereira et al. (2004) (8ª posição) e a alocação proposta neste trabalho (8ª posição).



(a) Alocação proposta por Pereira et al. (2004)

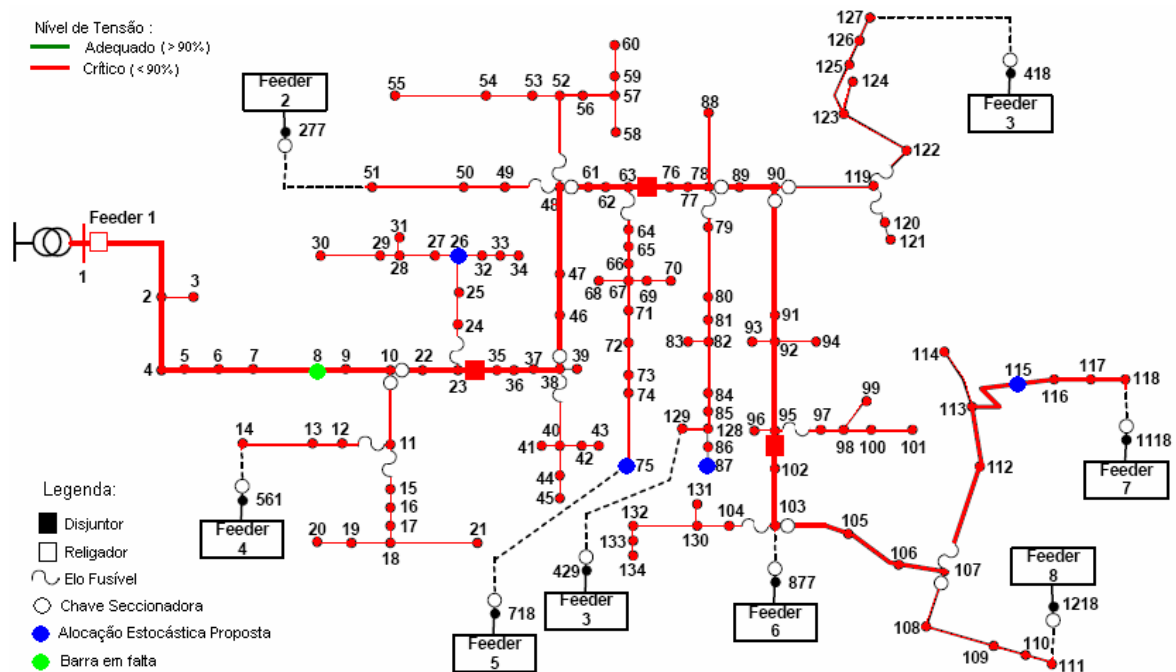


(b) Alocação otimizada proposta.

**Figura 4.5** Classificação das prováveis barras em falta para uma falta na barra 8.

Para uma falta trifásica as duas propostas de alocação forneceram a mesma posição na classificação das prováveis barras em falta.

O alimentador apresentou queda de tensão elevada em todas as barras para as três fases, como pode ser observado na Figura 4.6 para a fase A, Figura 4.7 para a fase B e Figura 4.8 para a fase C do alimentador de distribuição.

**Figura 4.6** Nível de tensão da fase A durante o período transitório.



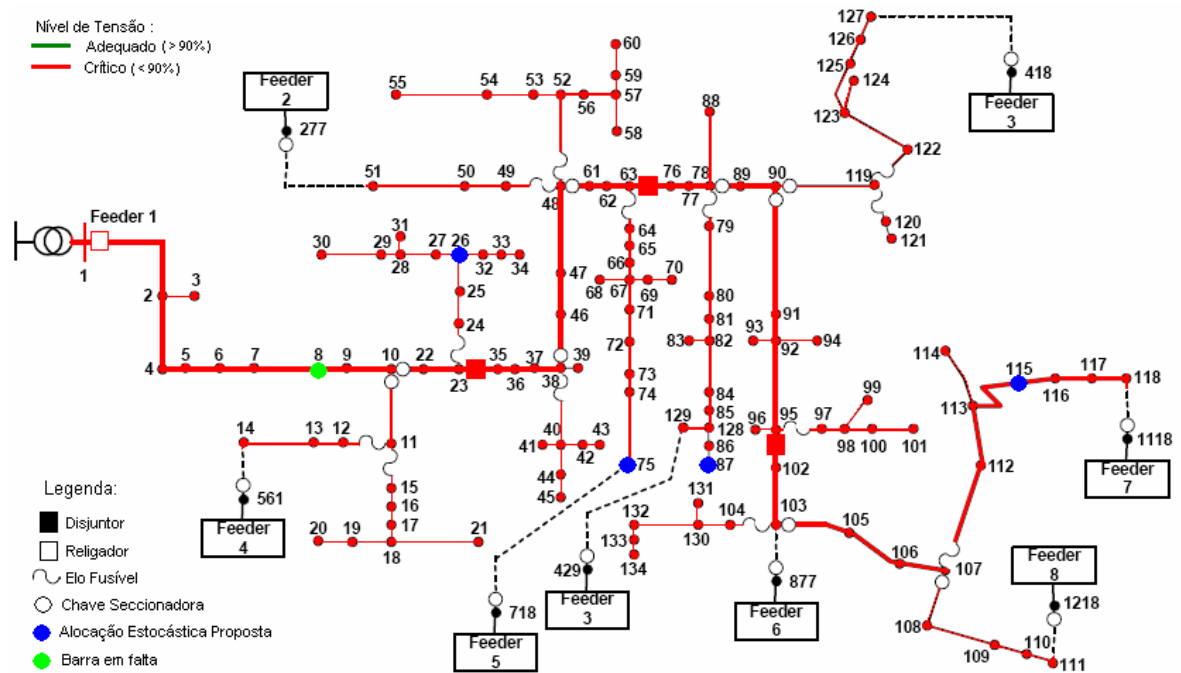


Figura 4.7 Nível de tensão da fase B durante o período transitório.

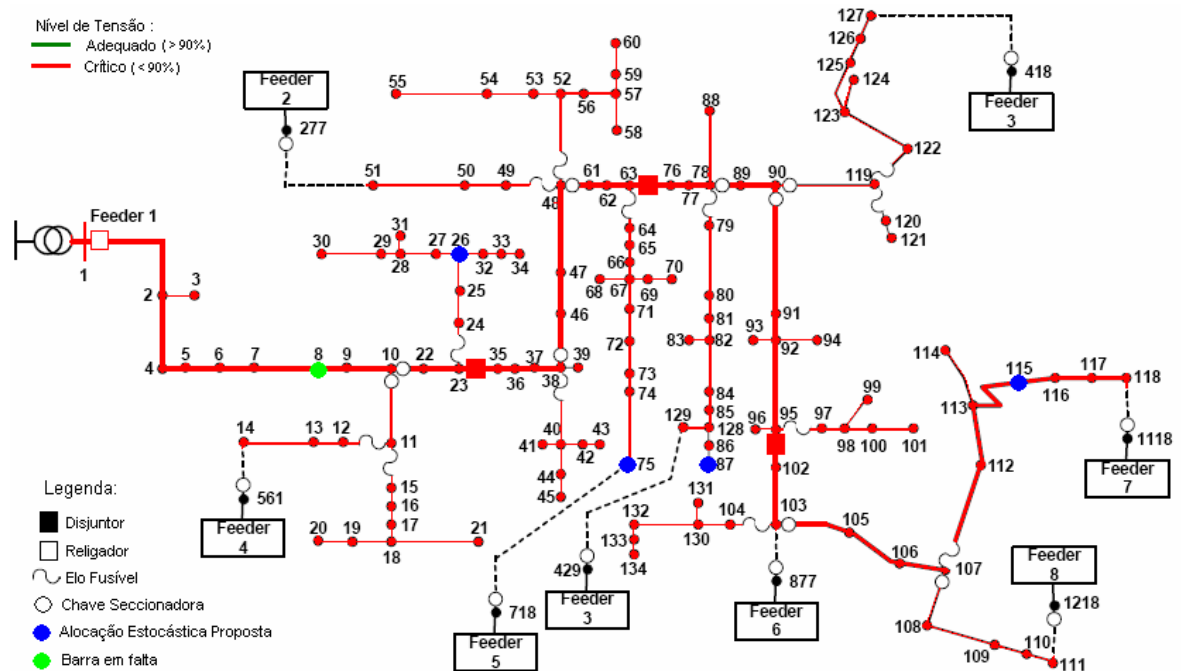


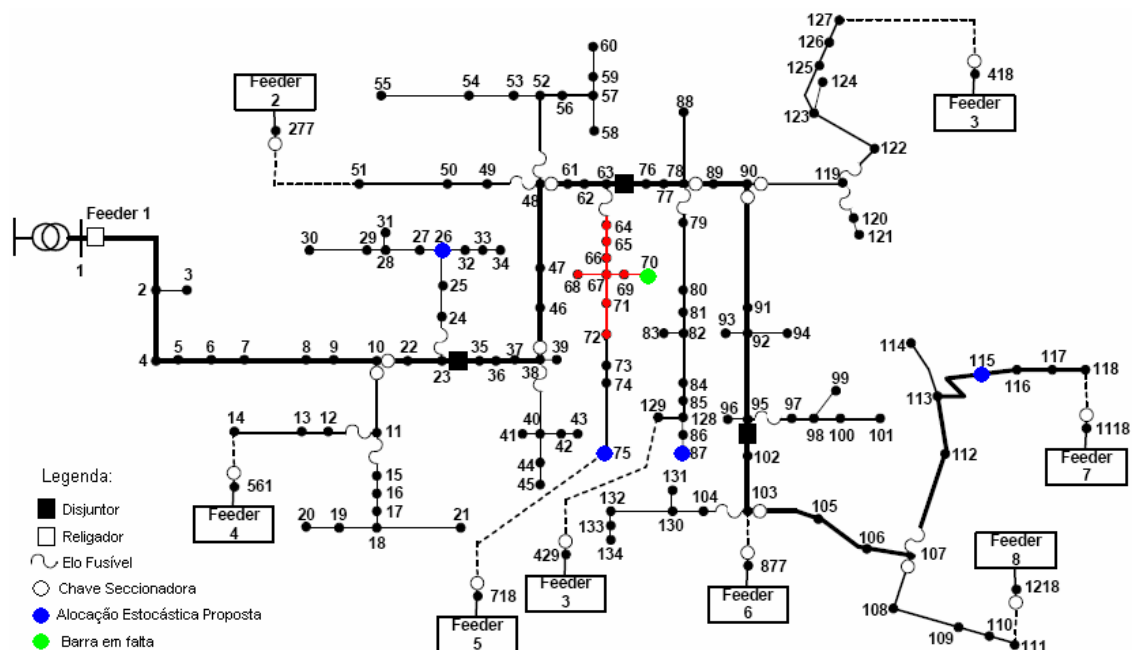
Figura 4.8 Nível de tensão da fase C durante o período transitório.

### Falta na Barra 70

Para uma falta na barra 70 foram consideradas as seguintes condições testes:

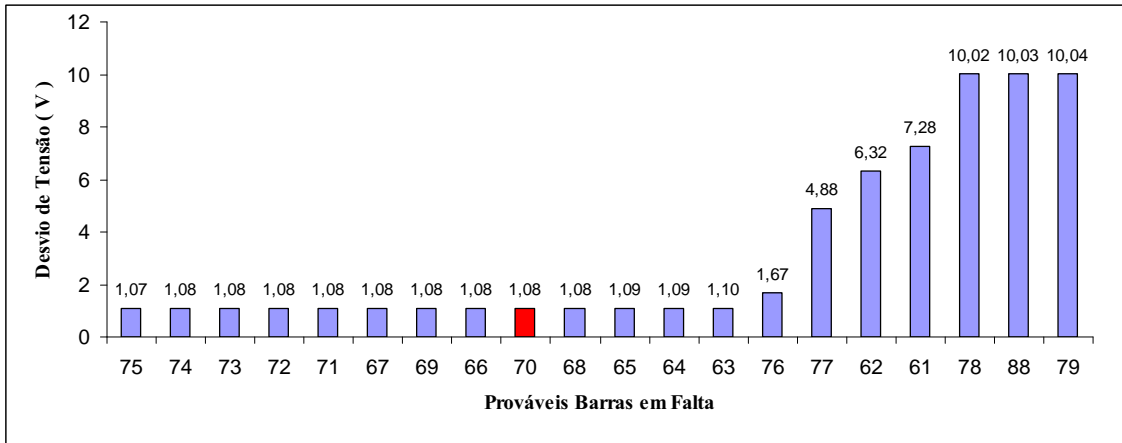
- Foi aplicada uma falta fase A – terra;
- Resistência de falta fase-terra é igual a 28,421.

Na Figura 4.9 ilustra-se o ponto onde foi simulada a falta (barra verde) e a região de localização da falta fornecida pelo sistema de localização de faltas utilizando a configuração ótima proposta (região das 10 primeiras barras localizadas).

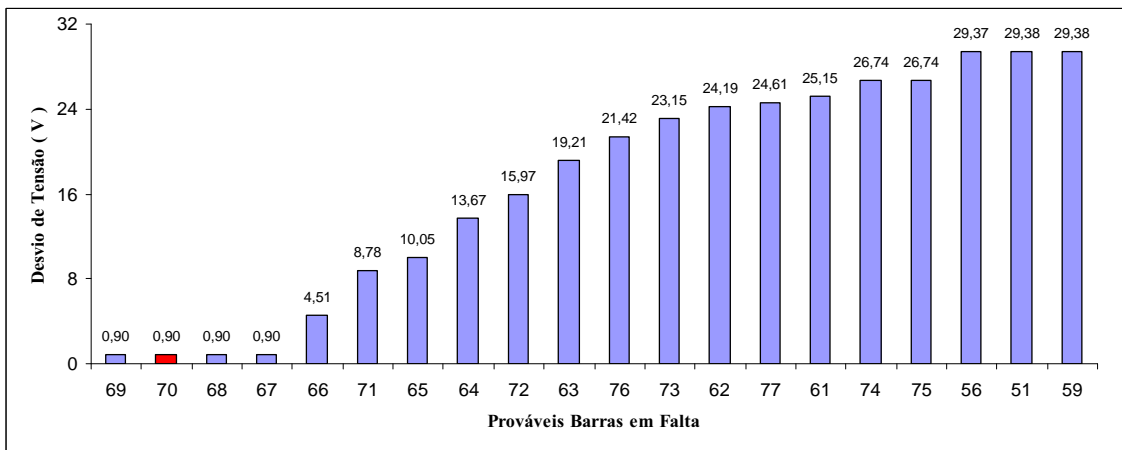


**Figura 4.9** Falta na barra 70 e provável região em falta.

Na Figura 4.10 é feita uma comparação entre os resultados obtidos pelo sistema de localização de faltas para a alocação de medidores de tensão proposta por Pereira et al. (2004) (9ª posição) e com a alocação proposta neste trabalho (2ª posição), para uma falta monofásica na barra 70.



(a) Alocação proposta por Pereira et al. (2004)



(b) Alocação otimizada proposta.

**Figura 4.10** Classificação das prováveis barras em falta para uma falta na barra 70.

Para uma falta na barra 70 houve uma melhora significativa quanto à posição e classificação das barras em falta, diminuindo a região provável de ocorrência da falta em 220 metros, sendo que as barras 73, 74 e 75 deixaram de fazer parte da região de indicação da falta. O sistema de localização de faltas não teve dificuldades em classificar as faltas porque estas apresentaram valores para os desvios de tensão bem diferentes, o que mostra uma boa precisão no sistema de localização de faltas. Já a alocação proposta por Pereira et al. (2004) teve dificuldade em classificar as faltas porque muitas barras apresentaram valores para os desvios de tensão muito próximos.

O nível de tensão das três fases do alimentador está representado na Figura 4.11 para a fase A, na Figura 4.12 para a fase B e na Figura 4.13 para a fase C

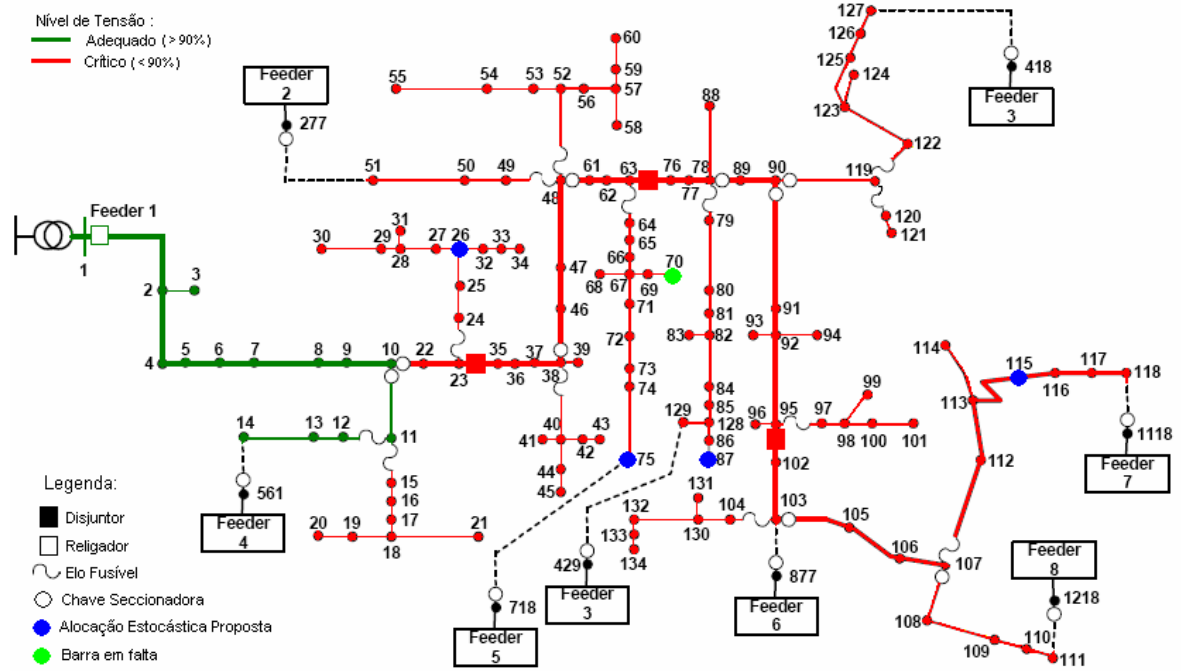


Figura 4.11 Nível de tensão da fase A durante o período transitório.

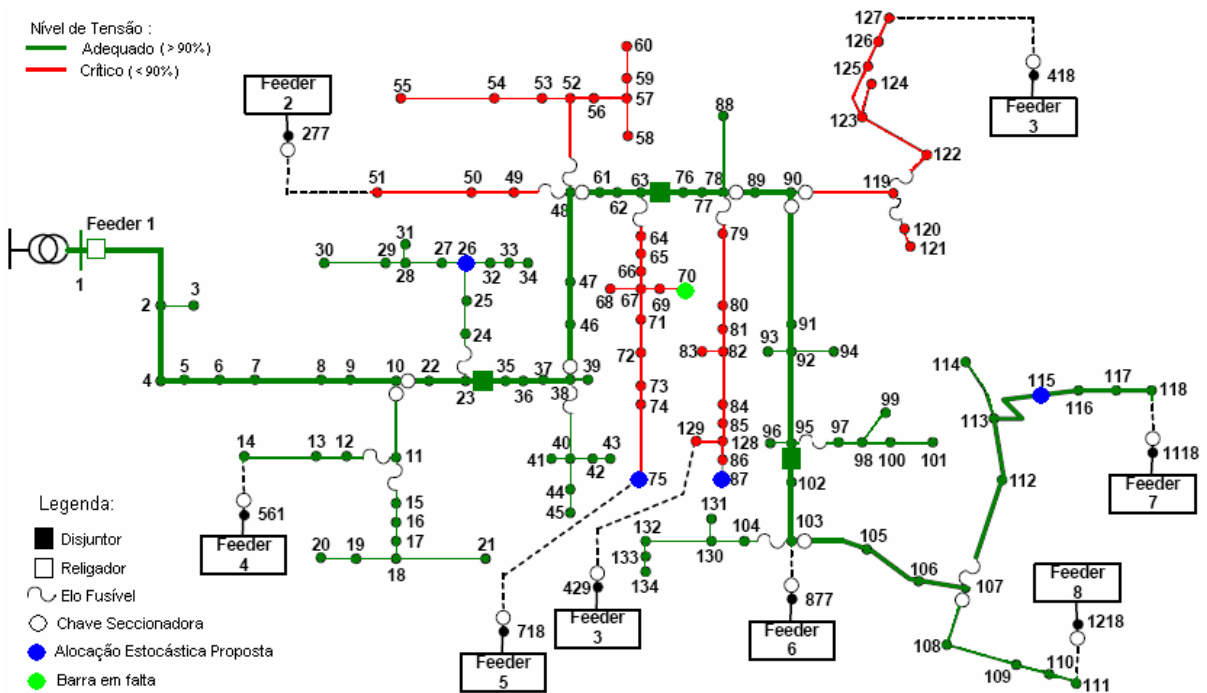
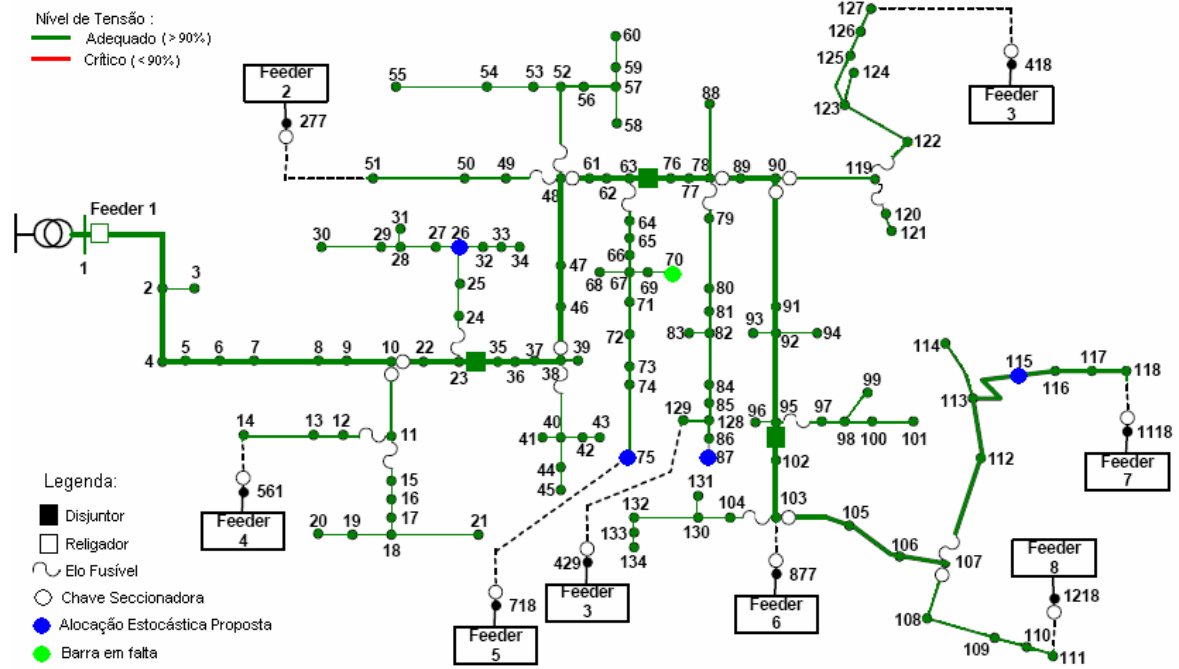
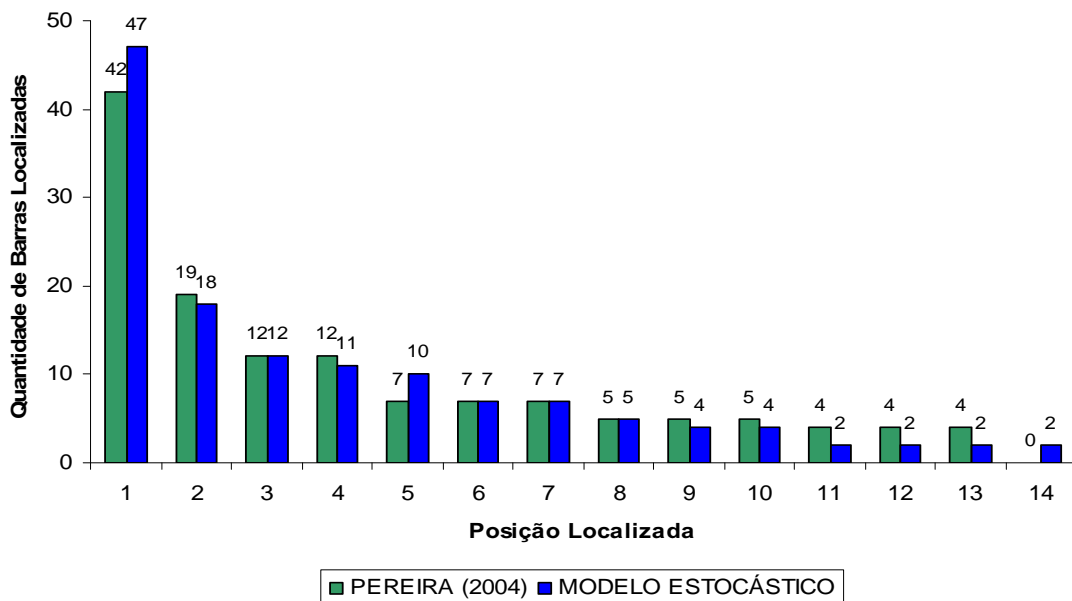


Figura 4.12 Nível de tensão da fase B durante o período transitório.



**Figura 4.13** Nível de tensão da fase C durante o período transitório.

A seguir apresenta-se uma comparação dos resultados obtidos para a posição das barras localizadas usando as duas propostas de alocação otimizada dos medidores de tensão. Para cada barra do alimentador foi aplicada uma falta fase A – terra e a posição real da barra, localizada na classificação feita pelo algoritmo de localização de faltas, está representada na Figura 4.14 , através de sua freqüência acumulada.



**Figura 4.14** Posição das barras localizadas para falta fase-terra.

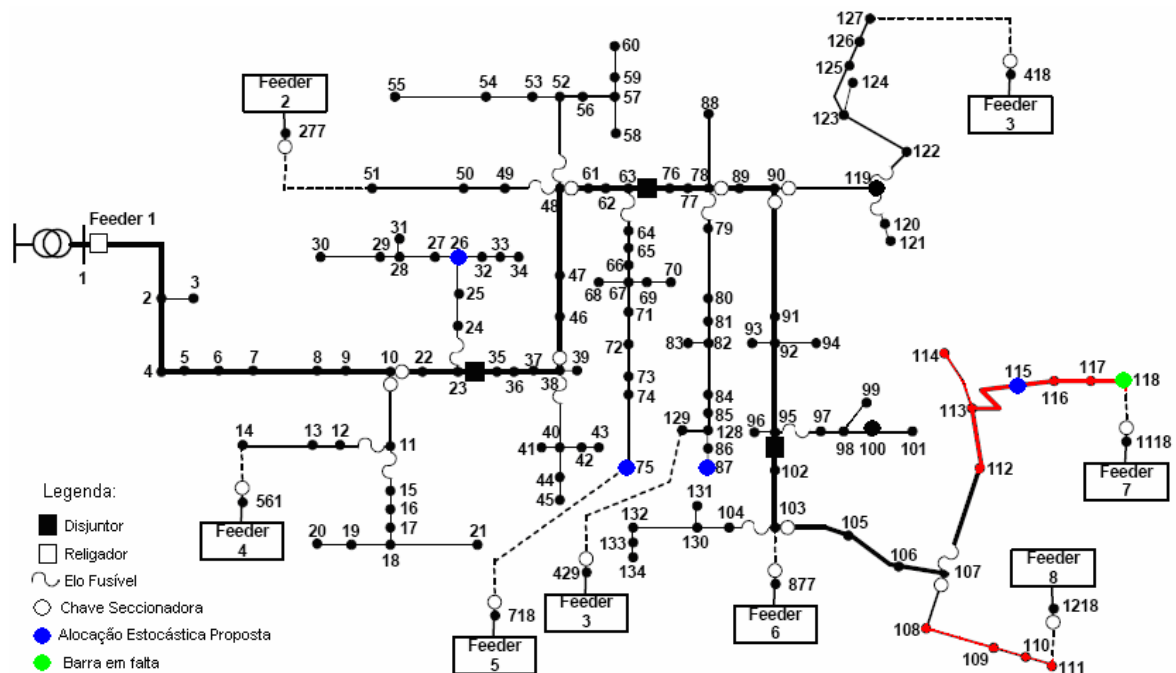
Pode-se observar através da Figura 4.14 que 73,7 % das barras foram localizadas entre as primeiras 5 posições para configuração de medidores proposta pelo modelo estocástico e para a configuração proposta pelo modelo determinístico localizou 69,2 % das barras para localizadas estão entre as 5 primeiras posições.

### Falta na Barra 118

Para uma falta na barra 118 foram consideradas as seguintes condições testes:

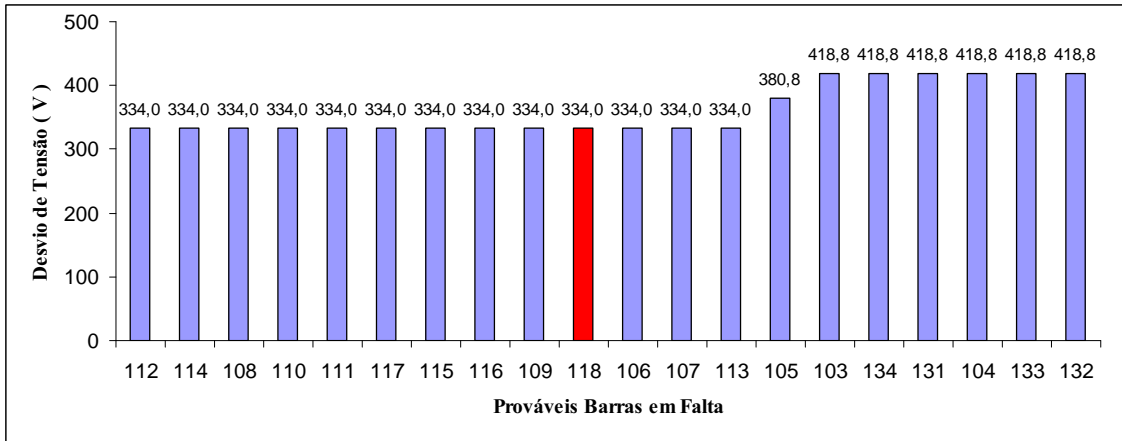
- Foi aplicada uma falta entre as fases A e B;
- Resistência de falta fase-terra é igual a 31,204;
- Resistência de falta entre fases é igual a 0,528.

Na Figura 4.15 ilustram-se os trechos do alimentador com o ponto onde foi simulada a falta (barra verde) e a região de localização da falta fornecida pelo sistema de localização de faltas utilizando a configuração ótima proposta (região dos 10 primeiros pontos localizados).

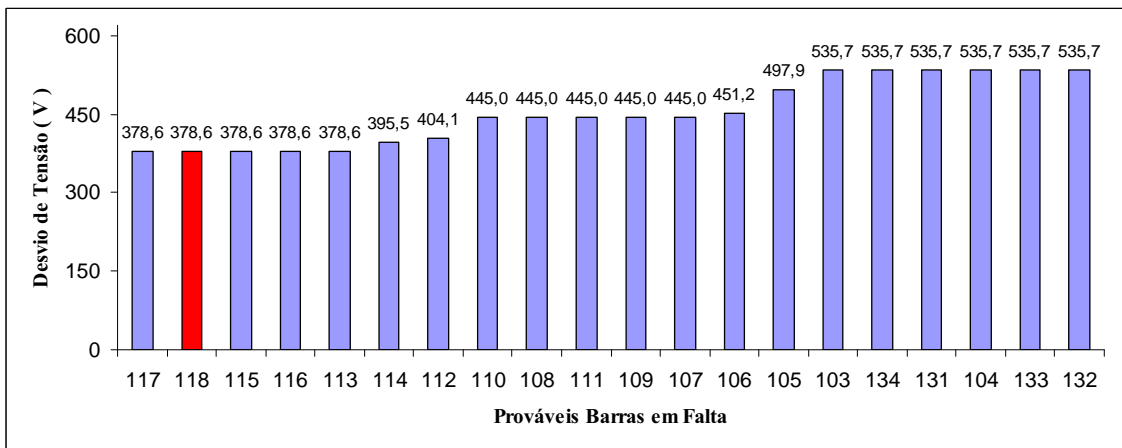


**Figura 4.15** Falta na barra 118 e provável região em falta.

Na Figura 4.16 faz-se uma comparação entre os resultados obtidos pelo sistema de localização de faltas para a alocação de medidores de tensão proposta por Pereira et al. (2004) (10ª posição) com o sistema proposto neste trabalho (2ª posição).



(a) Alocação proposta por Pereira et al. (2004)

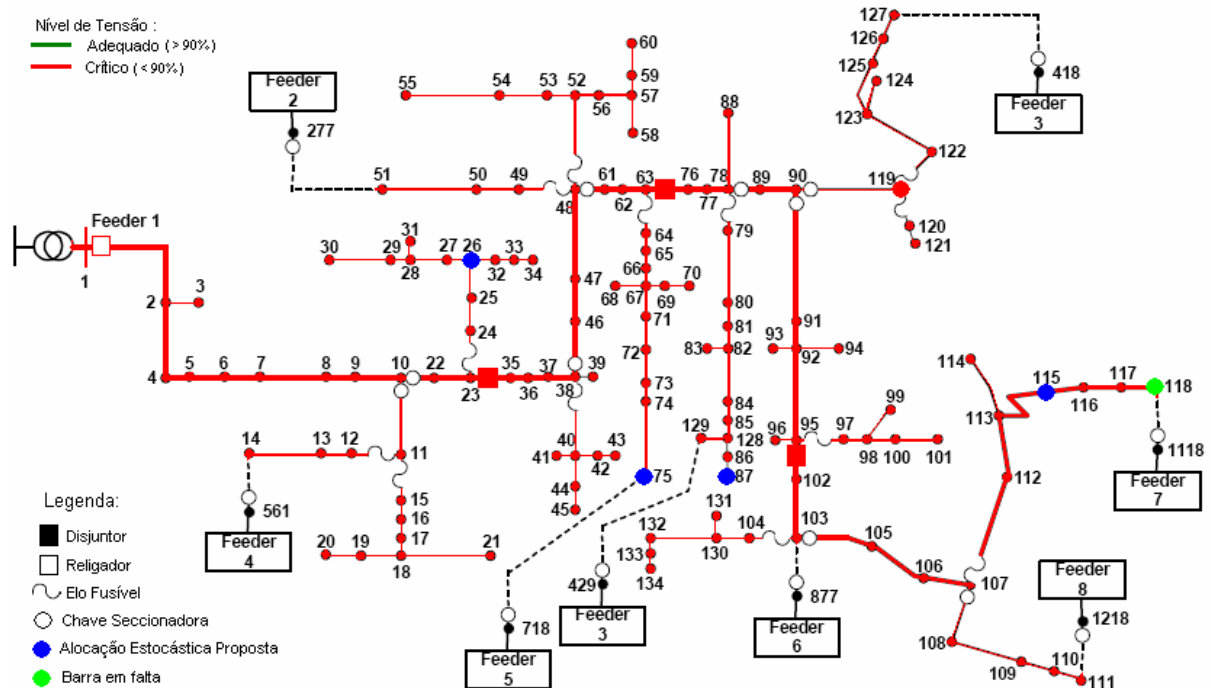


(b) Alocação otimizada proposta.

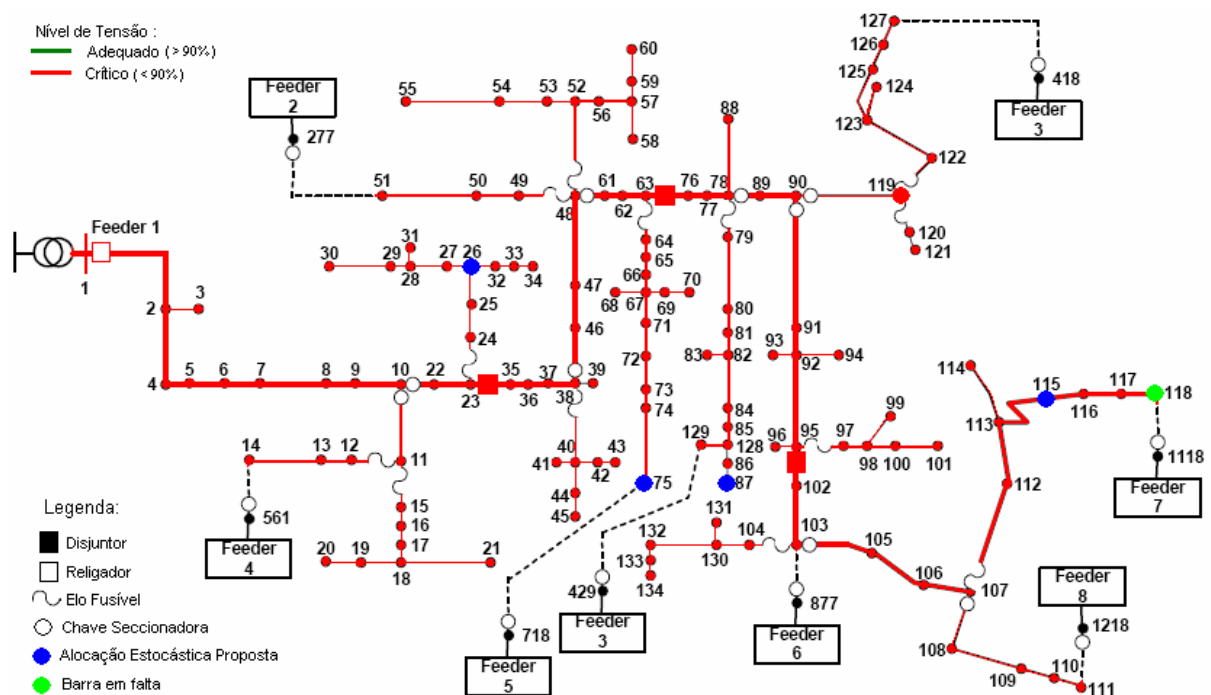
**Figura 4.16** Classificação das prováveis barras sob falta para uma falta na barra 118.

Houve uma melhoria considerável na classificação das barras em falta, porém, para uma falta bifásica gerada aleatoriamente o programa identificou duas regiões distintas como provável região de ocorrência da falta, como pode ser observado na Figura 4.15 .

O nível de tensão calculado para o alimentador está representado na Figura 4.17 para a fase A, na Figura 4.18 para a fase B e na Figura 4.19 para a fase C.

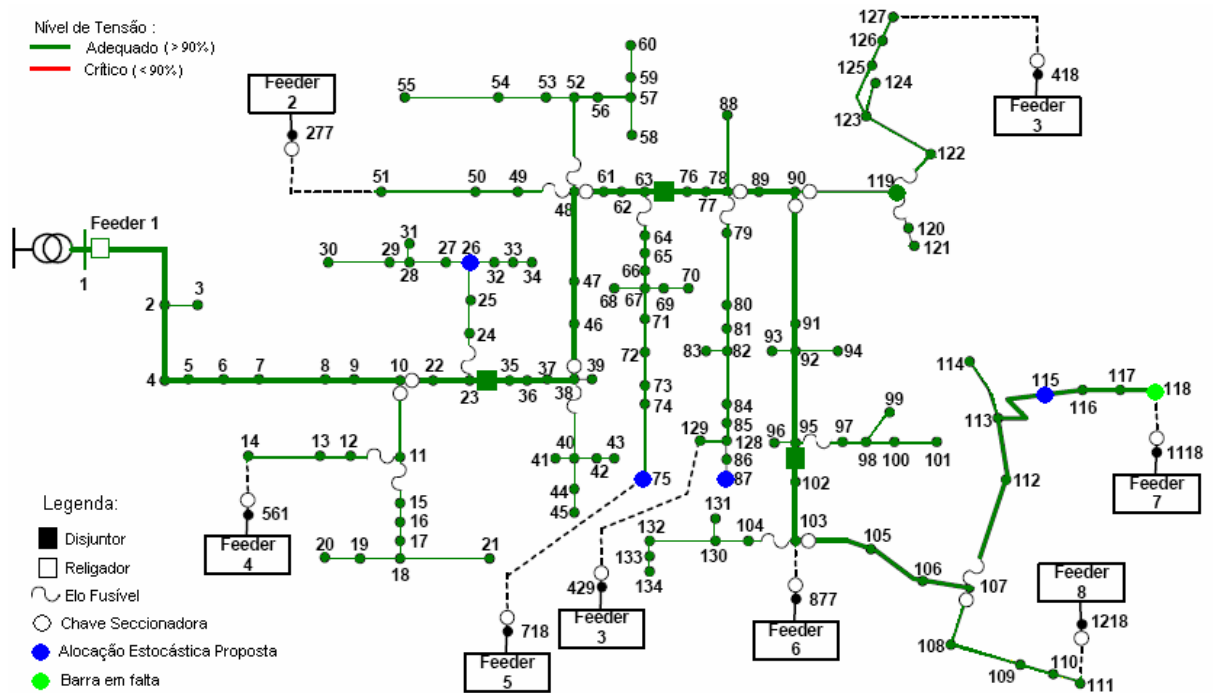


**Figura 4.17** Nível de tensão da fase A durante o período transitório.



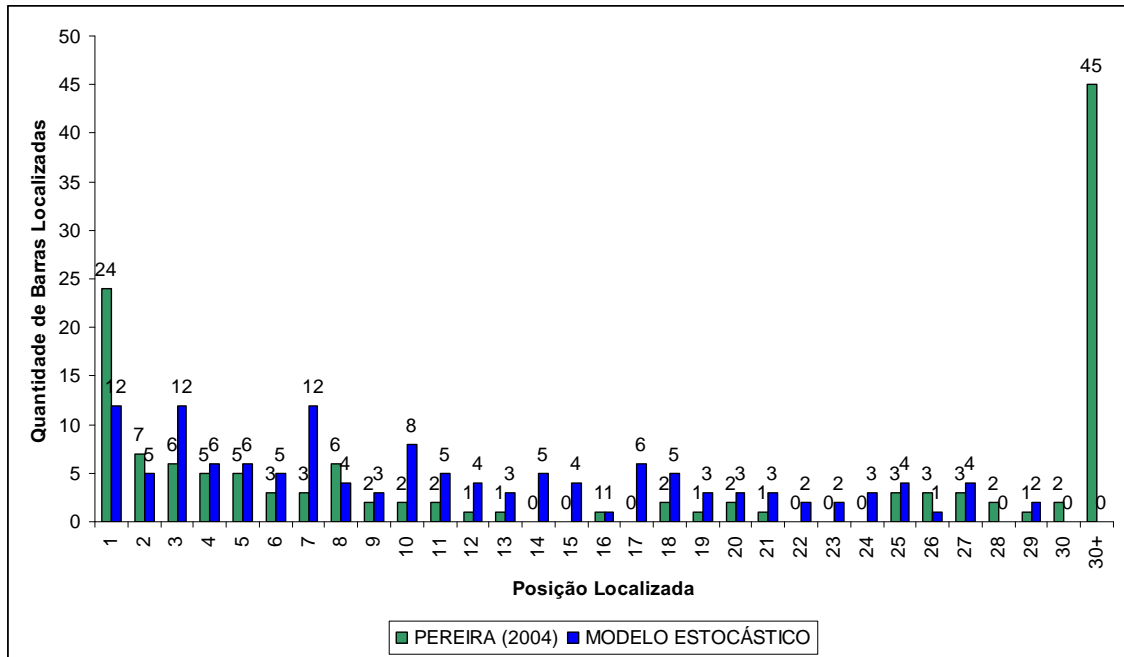
**Figura 4.18** Nível de tensão da fase B durante o período transitório.





**Figura 4.19** Nível de tensão da fase C durante o período transitório.

A seguir apresenta-se uma comparação dos resultados obtidos para a posição das barras localizadas usando as duas propostas de alocação otimizada dos medidores de tensão. Para cada barra do alimentador foi aplicada uma falta entre as fases A e B e a posição real da barra, na classificação feita pelo sistema de localização de falta, é apresentada na Figura 4.20, através de sua frequência acumulada.



**Figura 4.20** Posição das barras localizadas para uma falta entre as fases A e B.

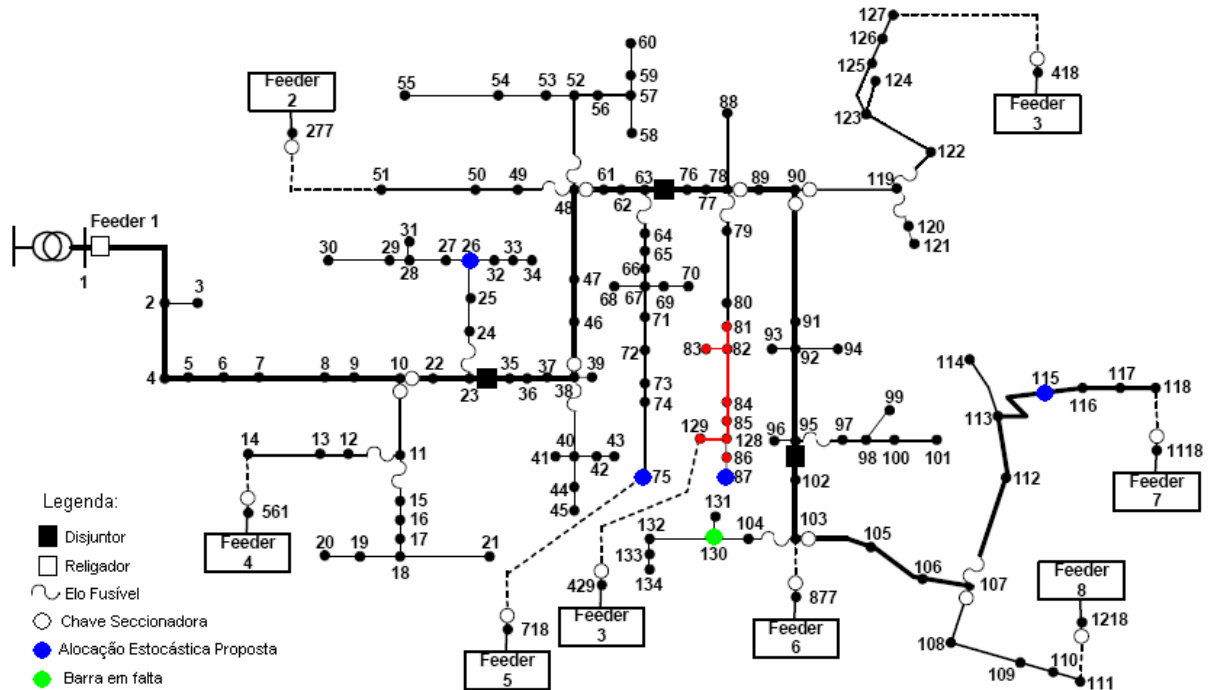
Para faltas entre as fases A e B o sistema de localização de faltas apresentou uma eficiência bem maior com a alocação proposta pelo modelo estocástico, estando 84,2 % das faltas localizadas até a vigésima posição. Já a proposta de alocação de medidores pelo modelo determinístico apresentou uma eficiência de 54,9 % na localização das faltas considerando-se a mesma faixa de posições.

### **Falta na Barra 130**

Para uma falta na barra 130 foram consideradas as seguintes condições testes:

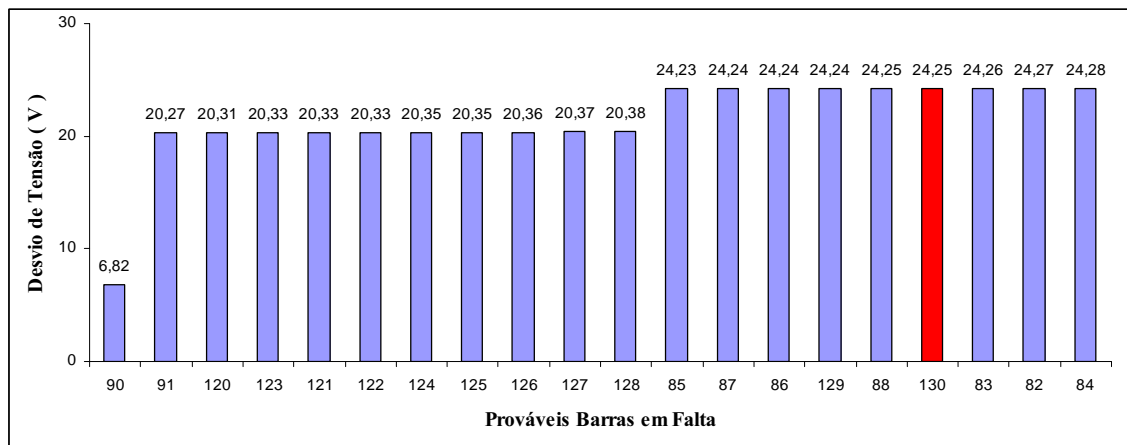
- Foi aplicada uma falta na fase B;
- Resistência de falta fase-terra é igual a 13,067.

Na Figura 4.21 ilustram-se os trechos do alimentador com o ponto onde foi simulada a falta (barra verde) e a região de localização da falta fornecida pelo algoritmo proposto (região dos 10 primeiros pontos localizados) para uma falta na barra 130.

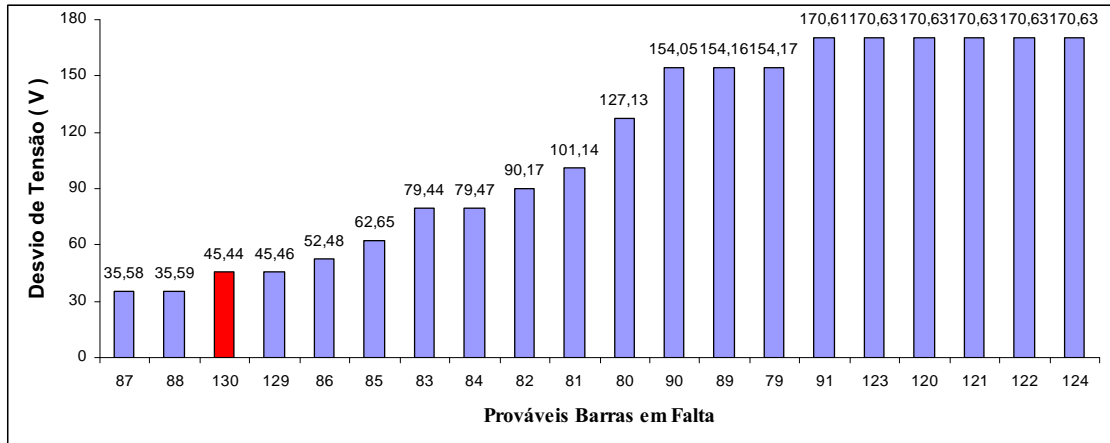


**Figura 4.21** Falta na barra 130 e provável região em falta.

Na Figura 4.22 faz-se uma comparação entre os resultados obtidos pelo sistema de localização de faltas para a alocação de medidores proposta por Pereira et al. (2004) (17<sup>a</sup> posição) e a alocação proposta neste trabalho (3<sup>a</sup> posição).



(a) Alocação proposta por Pereira et al. (2004)

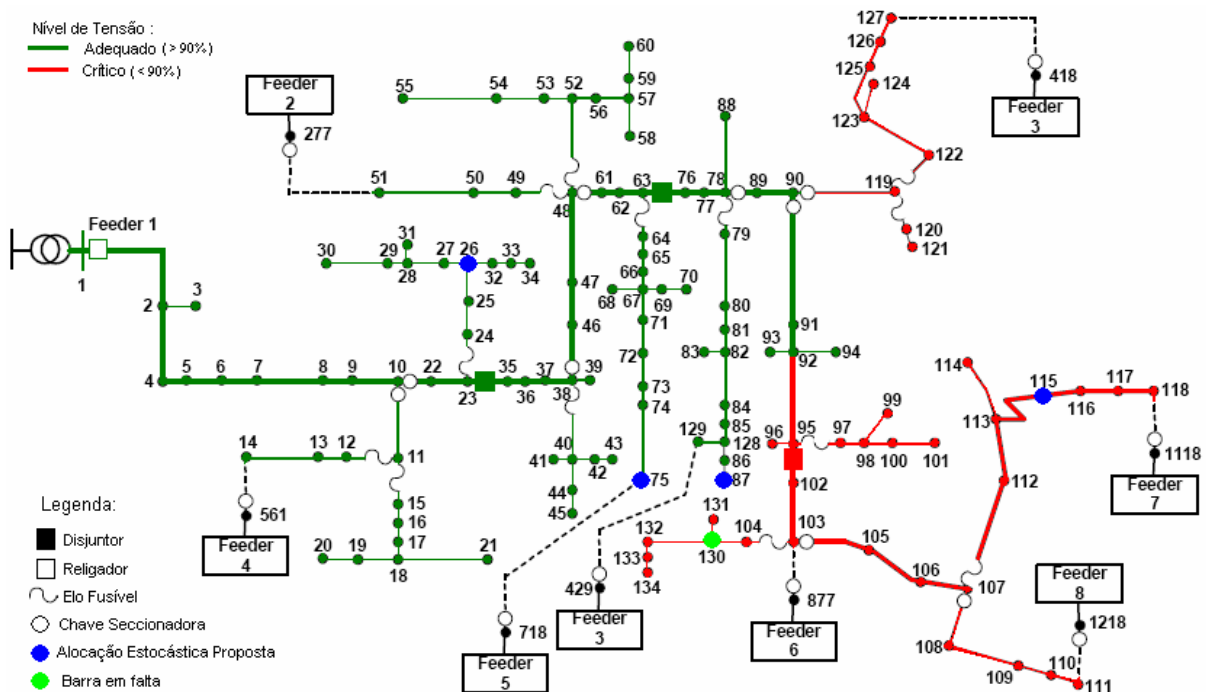


(b) Alocação otimizada proposta.

**Figura 4.22** Classificação das prováveis barras sob falta para uma falta na barra 130.

Houve uma melhora significativa quanto à posição da classificação das barras em falta e da provável região de ocorrência da falta. O sistema de localização de faltas não teve dificuldades em classificar as faltas porque estas apresentaram valores bem distintos para os desvios de tensão, o que mostra uma boa precisão do sistema de localização de faltas. Já a alocação proposta por Pereira et al. (2004) teve dificuldade em classificar as faltas porque muitas barras apresentaram valores muito próximos para os desvios de tensão.

O nível de tensão para as três fases do alimentador está representado na Figura 4.23 para a fase A, na Figura 4.24 para a fase B e na Figura 4.25 para a fase C.

**Figura 4.23** Nível de tensão da fase A durante o período transitório.

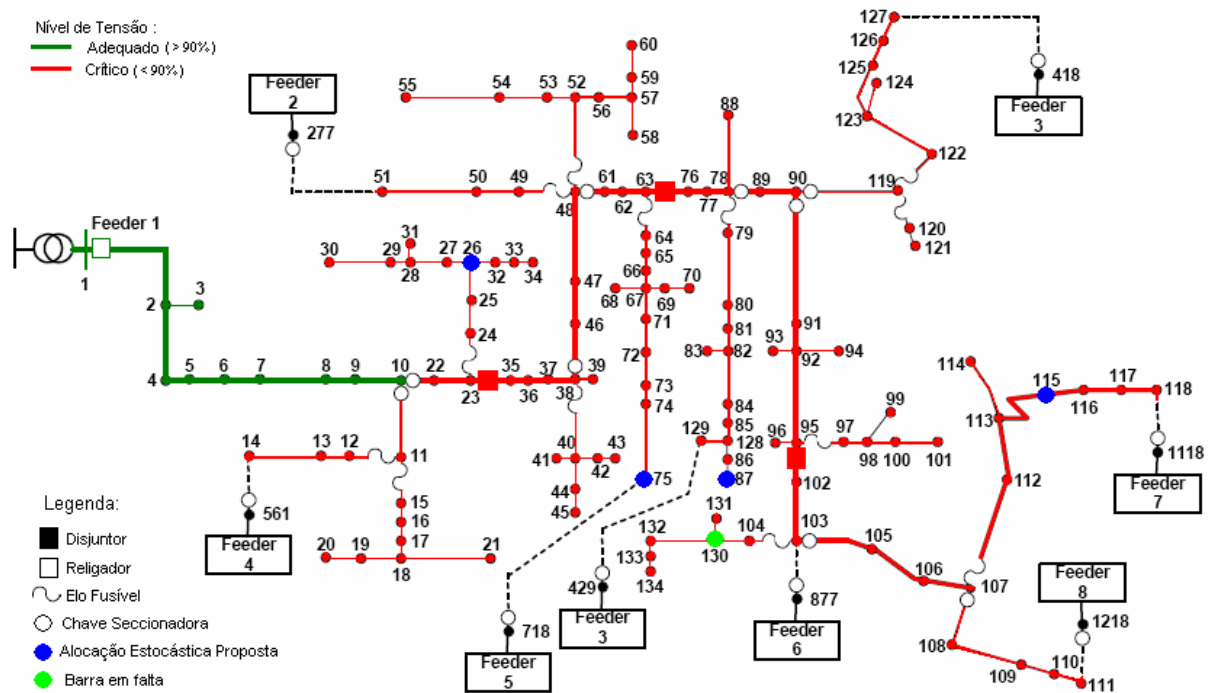


Figura 4.24 Nível de tensão da fase B durante o período transitório.

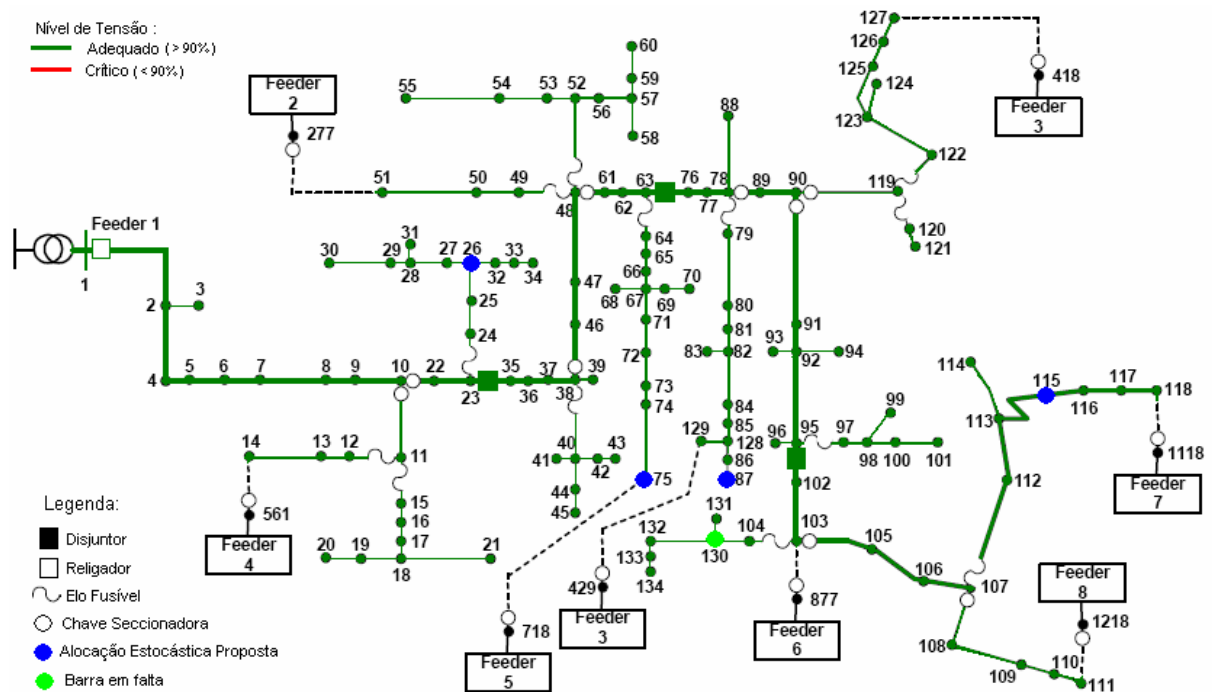
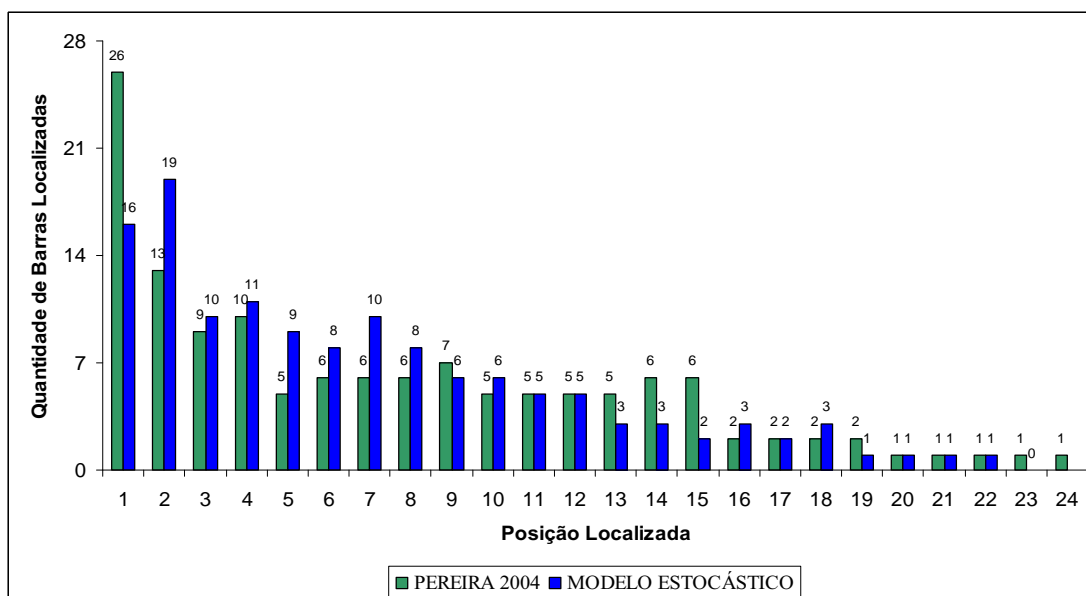


Figura 4.25 Nível de tensão da fase C durante o período transitório.

Apresenta-se a seguir uma comparação dos resultados obtidos para a posição das barras localizadas usando as duas propostas de alocação otimizada dos medidores de tensão. Para cada barra do alimentador foi aplicada uma falta fase B – terra com resistência de falta 5,0 ohms e a posição real localizada da classificação das barras feita pelo algoritmo de localização de faltas estão representadas na Figura 4.26 .



**Figura 4.26** Posição das barras localizadas para falta fase-terra de baixa impedância.

A alocação otimizada dos medidores usando o modelo estocástico diminuiu a dispersão das barras localizadas, ou seja, quando o algoritmo de localização de faltas não classifica a falta como primeira opção ele a classifica numa posição bem próxima, como pode ser observado através da Figura 4.26 , apesar da alocação proposta por Pereira et al. (2004) identificar um maior número de barras como primeira opção.

Para falta fase-terra de baixa impedância o sistema identificou uma queda de tensão elevada na fase em falta para todas as barras, assim, o valor do conjunto esperado das barras com magnitude de tensão abaixo de 15% na função objetivo torna-se um valor constante para quaisquer configurações de medidores utilizadas. Apesar de tornar o valor da função objetivo negativo devido ao decremento de uma parcela grande, sua influência torna-se nula nos resultados da alocação ótima dos medidores, ficando a função objetivo sensível apenas ao resultado da distância esperada entre o local verdadeiro da falta e os possíveis locais de falta apontados pelo sistema de localização de faltas.

## 4.2 Alimentador 2

Apresentam-se a seguir os resultados obtidos para a alocação ótima dos medidores esparsos de tensão para um alimentador de distribuição trifásico com 3287 barras e tensão nominal de 11,4 kV, pertencente a um sistema real de distribuição de energia elétrica. Este alimentador foi escolhido para ser implantando o primeiro sistema piloto de localização de faltas.

Optou-se por utilizar 4 medidores de tensão alocados ao longo do alimentador para fornecer os dados de medição de tensão necessários ao sistema de localização das faltas. *A priori* nenhuma consideração relacionada com uma possível alocação otimizada dos medidores de tensão nos alimentadores foi considerada. Com base nos conhecimentos sobre os problemas relacionados com a localização de faltas, os medidores foram alocados de forma heurística, nas barras 423, 1649, 1777 e 2772. Essa heurística consiste basicamente em alocar os medidores em pontos distantes uns dos outros, evitando-se a alocação de mais de um medidor no ramal principal, pois, desta forma, obtém-se uma maior diversidade das grandezas medidas. A alocação dos medidores de energia no alimentador impacta diretamente na precisão dos resultados do algoritmo de localização de faltas, uma vez que, dependendo das características das cargas e da topologia do alimentador, a alocação de um medidor em um determinado nó pode melhorar ou degradar a precisão do algoritmo. Análises para alocação otimizada adotando funções-objetivos que consideram somente o acerto ou não na localização da falta para algoritmos similares ao proposto por Pereira et al. (2008) foram abordadas em Pereira et al. (2004) e Pereira et al. (2006).

### 4.2.1 Alocação otimizada dos medidores de tensão

Para a solução do problema de alocação otimizada dos medidores de tensões foram consideradas as seguintes condições de teste:

- Através de estudos preliminares verificou-se que o número ideal de medidores a serem alocados no alimentador, para o bom desempenho do algoritmo de localização de faltas é, no máximo, igual a 4;
- As magnitudes das tensões, durante os afundamentos, passam a ser críticas quando assumem valores abaixo de 90% da tensão nominal, sendo assim, estabelece-se o limite para afundamento de tensão ( $\epsilon_v$ ) em 10%;

- O tamanho da lista restrita de candidatos (LRC) foi limitado à metade do tamanho da lista de candidatos (LC), sendo assim, o parâmetro de controle ( $\alpha$ ) do tamanho da LRC é igual a 0,4;
- O número máximo de iterações do algoritmo GRASP especializado (ITERmax) é definido em 100;
- Para determinar a região em falta consideram-se as 20 primeiras posições indicadas pelo algoritmo de localização de faltas, portanto, o número de barras consideradas para a soma das distâncias ( $np$ ) é igual a 20;
- Para quantidades grandes de amostras, a partir de 30 elementos, pode-se aplicar a distribuição normal nas análises estatísticas do problema com um bom grau de confiabilidade dos resultados. Assim, o número de faltas aplicadas ao sistema (iterobjMAX) para o cálculo da função objetivo é igual a 30.
- Na fase de busca local realiza-se o processo de busca na vizinhança da solução atual para três vizinhos escolhidos aleatoriamente, portanto, o número de iterações na fase de busca local é definido em 3;
- O nível de carregamento dos transformadores, nas simulações das faltas através do software ATP, é definido de acordo com a variação apresentada na Tabela 2.3;
- As resistências de falta fase-terra e entre fases, a barra em falta, a fase em falta e a taxa de falha dos medidores são consideradas variáveis estocásticas, conforme definido na Tabela 4.5.

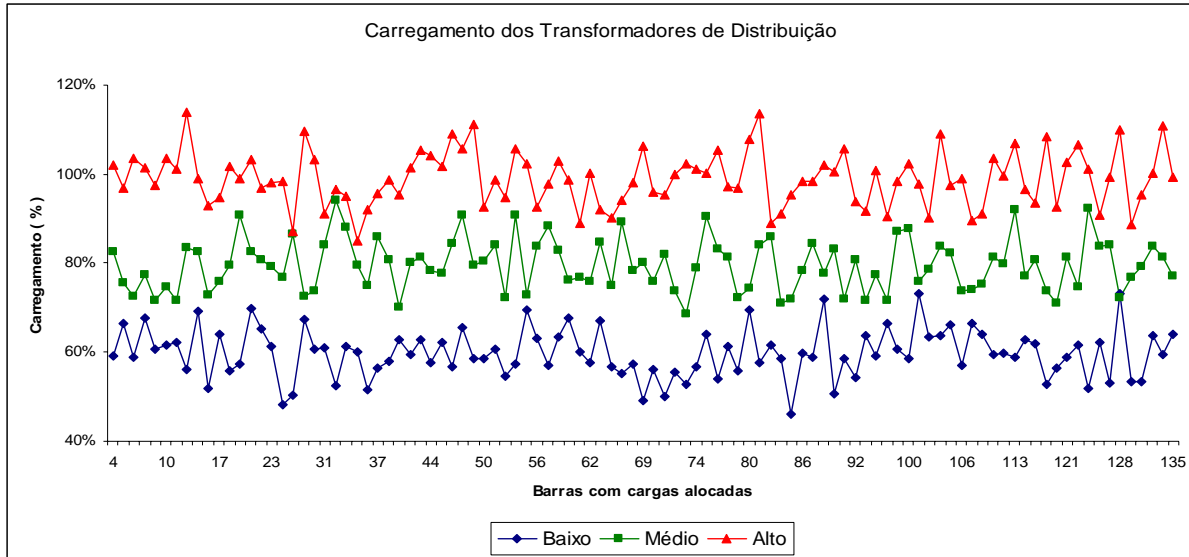
**Tabela 4.5** Variáveis estocásticas consideradas no modelo matemático.

Variável	Distribuição	Média	Desvio Padrão	Faixa de Variação
<b>Barra Falta</b>	<b>Uniforme</b>	-	-	$3 \leq \text{Barra}_f < 3289$
$R_{ff}$	<b>Normal</b>	<b>0,5</b>	<b>0,1294</b>	$0,1 < R_{ff} < 0,9 \Omega$
$R_{ft}$	<b>Normal</b>	<b>25</b>	<b>4,8544</b>	$10 < R_{ft} < 40 \Omega$
<b>Fase Falta</b>	<b>Normal</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	$0 < f(Z, \mu, \sigma) \leq 10 \rightarrow \text{falta } 3\phi$ $10 < f(Z, \mu, \sigma) \leq 40 \rightarrow \text{falta } 2\phi$ $f(Z, \mu, \sigma) > 40 \rightarrow \text{falta } 1\phi$
<b>Taxa de Falha dos medidores</b>	<b>Normal</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	$f(Z, \mu, \sigma) \leq 5 \rightarrow \text{falha do medidor}$

Os carregamentos dos transformadores simulados no ATP foram executados considerando um carregamento aleatório para cada transformador, de acordo com a equação 2.8. Para essa finalidade, uma variável aleatória  $\varepsilon$  com distribuição normal foi selecionada, conforme Tabela



2.3. Uma amostra dos níveis de carregamento dos transformadores gerados para as simulações das faltas no software ATP estão representadas na Figura 4.27 .



**Figura 4.27** Nível de carregamento dos transformadores de distribuição.

O algoritmo GRASP especializado na alocação otimizada dos medidores de tensão forneceu as posições ótimas apresentadas na Tabela 4.6.

**Tabela 4.6** Resultado da alocação otimizada dos medidores de tensão.

Posição dos Medidores			
397,	1133,	1589,	2062

O diagrama unifilar do alimentador de distribuição com os pontos de alocação ótima dos medidores encontrados através da metodologia proposta está representado na Figura 4.28 .

Para a configuração de medidores proposta neste trabalho e a configuração proposta heurísticamente foram calculados os valores das funções objetivo, considerando-se as seguintes condições testes:

- O número de faltas aplicadas ao sistema para o cálculo da função objetivo é 100;
- O limite para afundamento de tensão ( $\epsilon_v$ ) é estabelecido em 10%;
- Para determinar a região em falta consideram-se as 20 primeiras posições indicadas pelo algoritmo de localização de faltas, portanto, o número de barras consideradas para a soma das distâncias ( $n_p$ ) é igual a 20;

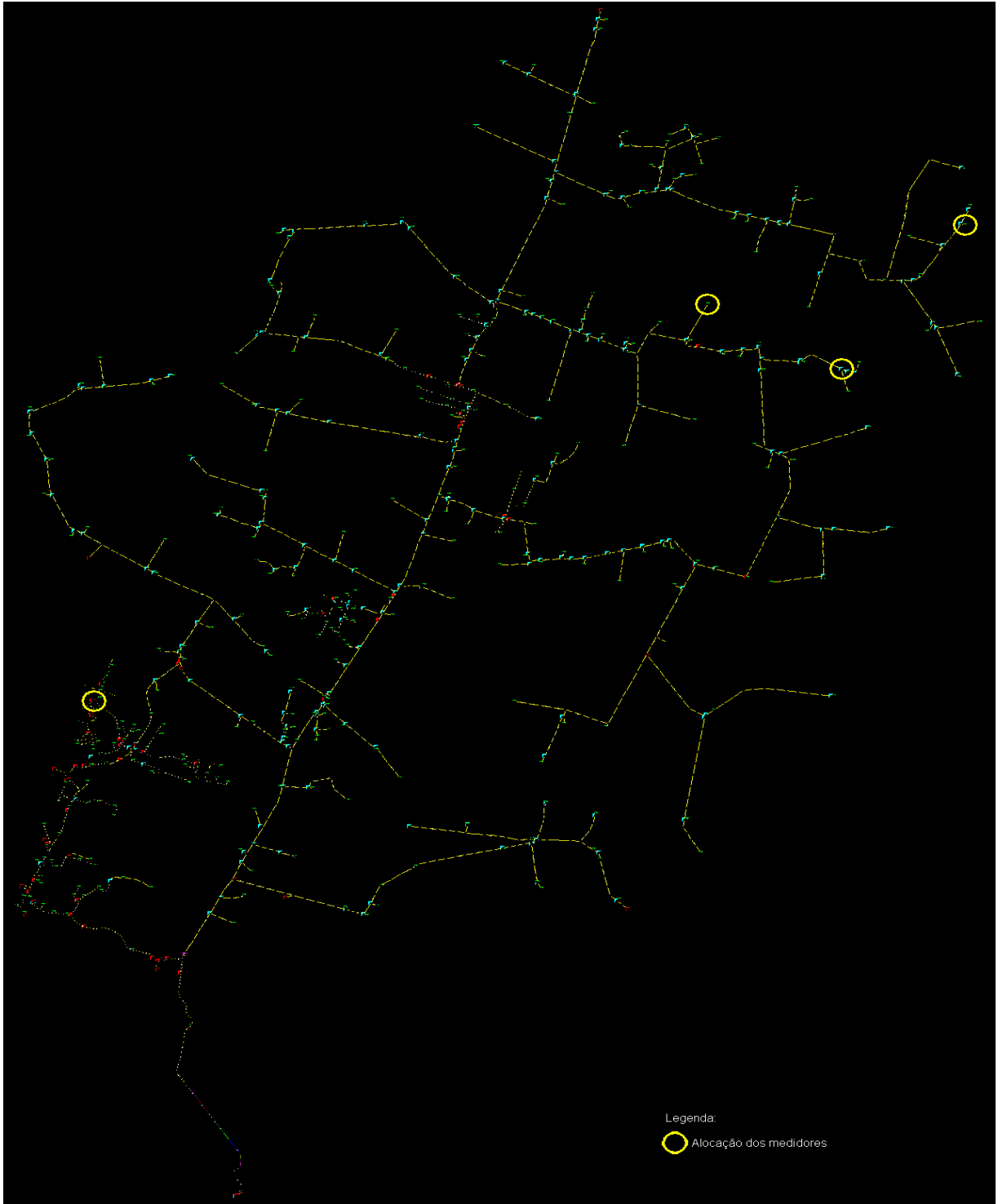
- As resistências de falta fase-terra e fase-fase, a barra em falta, a fase em falta e a taxa de falha dos medidores são consideradas variáveis estocásticas, conforme definido na Tabela 4.5.

A alocação ótima dos medidores de tensão através do modelo probabilístico proposto neste trabalho e a alocação proposta heurísticamente estão representadas na Tabela 4.7.

**Tabela 4.7** Alocação dos medidores.

<b>Proposta</b>	<b>Posição dos Medidores</b>
Modelo Estocástico Proposto	<b>397, 1133, 1589, 2062</b>
Alocação Heurística	423, 1649, 1777, 2772

O valor da função objetivo encontrado para a alocação ótima dos medidores de tensão pelo modelo estocástico proposto neste trabalho é bem melhor que o valor da função objetivo encontrado para a alocação realizada de forma heurística. Para demonstrar a real melhoria no sistema de localização de faltas são apresentados a seguir alguns testes onde se comparam os resultados das localizações de faltas obtidas através das duas configurações de medidores propostas.



**Figura 4.28** Alimentador real de distribuição com alocação ótima dos medidores.

#### 4.2.2 Sistema Localizador de Faltas

Para avaliar as melhorias no desempenho do sistema de localização de faltas com a alocação otimizada dos medidores de tensão definida pela técnica proposta foram realizadas diversas simulações, sob diferentes condições de testes e cenários de operação. A Tabela 4.8 apresenta os resultados de algumas faltas aleatórias simuladas e localizadas pelo sistema de localização de faltas.

**Tabela 4.8** Faltas aleatórias localizadas com as alocações ótimas propostas.

Número de Faltas	Fase Falta	Resistências			Alocação Otimizada			PEREIRA et al. 2004		
		Fase Terra	Entre Fases	Barra em Falta	Posição Classifi cada	$\sum dpf_{pl}$ (10 primeiras)	$\sum Barras$ ( $\Delta V < 0,90$ )	Posição Classifi cada	$\sum dpf_{pl}$ (10 primeiras)	$\sum Barras$ ( $\Delta V < 0,90$ )
1	B	26,602	0,345	418	1	7667,50	418	1	4999,20	418
2	A	<b>31,16</b>	<b>0,385</b>	<b>853</b>	<b>4</b>	<b>3799,80</b>	<b>818</b>	<b>24</b>	<b>5781,00</b>	<b>818</b>
3	A	24,772	0,278	1362	4	5875,40	818	4	5085,10	818
4	CAT	30,025	0,531	278	125	18008,51	392	125	33346,50	392
5	B	28,126	0,56	417	6	6000,90	416	8	5540,40	416
6	A	26,997	0,679	1468	15	14143,60	818	15	6034,30	818
7	ABC	29,84	0,265	277	100	12277,20	318	100	26334,69	318
8	B	26,235	0,634	2162	5	22799,19	442	5	13715,59	442
9	<b>B</b>	<b>26,7</b>	<b>0,335</b>	<b>3058</b>	<b>2</b>	<b>7726,30</b>	<b>441</b>	<b>43</b>	<b>9535,30</b>	<b>441</b>
10	AB	20,013	0,427	2209	15	35033,00	812	26	21071,38	812
11	A	27,442	0,603	218	10	7052,30	818	11	5760,40	818
12	CAT	25,09	0,213	1060	25	14144,29	735	25	13982,20	735
13	C	21,328	0,695	205	10	7587,70	462	10	8211,00	462
14	B	24,336	0,489	414	2	2260,40	418	31	6812,00	418
15	<b>ABC</b>	<b>31,14</b>	<b>0,581</b>	<b>2089</b>	<b>7</b>	<b>3555,70</b>	<b>16</b>	<b>20</b>	<b>7036,00</b>	<b>16</b>
16	CA	24,798	0,602	281	34	23373,09	419	41	28149,11	419
17	A	23,905	0,608	212	4	3801,00	818	4	4646,90	818
18	C	23,485	0,269	2093	1	1639,50	462	1	1157,90	462
19	A	30,055	0,7	1108	2	7323,90	818	2	7198,60	818
20	BC	34,203	0,567	1039	236	53583,27	569	236	76373,21	569
21	A	24,971	0,381	965	3	2673,10	818	3	3021,40	818
22	B	21,377	0,526	1166	22	4124,90	433	22	3961,90	433
23	<b>CAT</b>	<b>18,51</b>	<b>0,773</b>	<b>3243</b>	<b>7</b>	<b>940,60</b>	<b>467</b>	<b>20</b>	<b>2991,10</b>	<b>467</b>
24	A	32,826	0,709	774	8	1848,10	818	8	5512,70	818
25	B	25,265	0,358	1902	12	4131,10	467	20	12762,20	467
26	ABCT	27,913	0,442	1506	25	31902,30	323	26	42135,98	323
27	C	23,485	0,269	2093	1	1639,50	462	1	1157,90	462
28	C	26,255	0,443	843	2	5887,60	418	6	2573,80	418
29	AB	24	0,557	1418	118	12997,69	758	119	13741,41	758
30	B	27,608	0,739	541	12	9140,80	441	12	7574,10	441

Serão apresentados os resultados para as faltas simuladas nas barras 853, 2089, 3058 e 3243. Para as faltas em cada uma dessas barras foram geradas as formas de ondas das tensões e correntes na saída do alimentador na subestação e as formas de onda das tensões em pontos

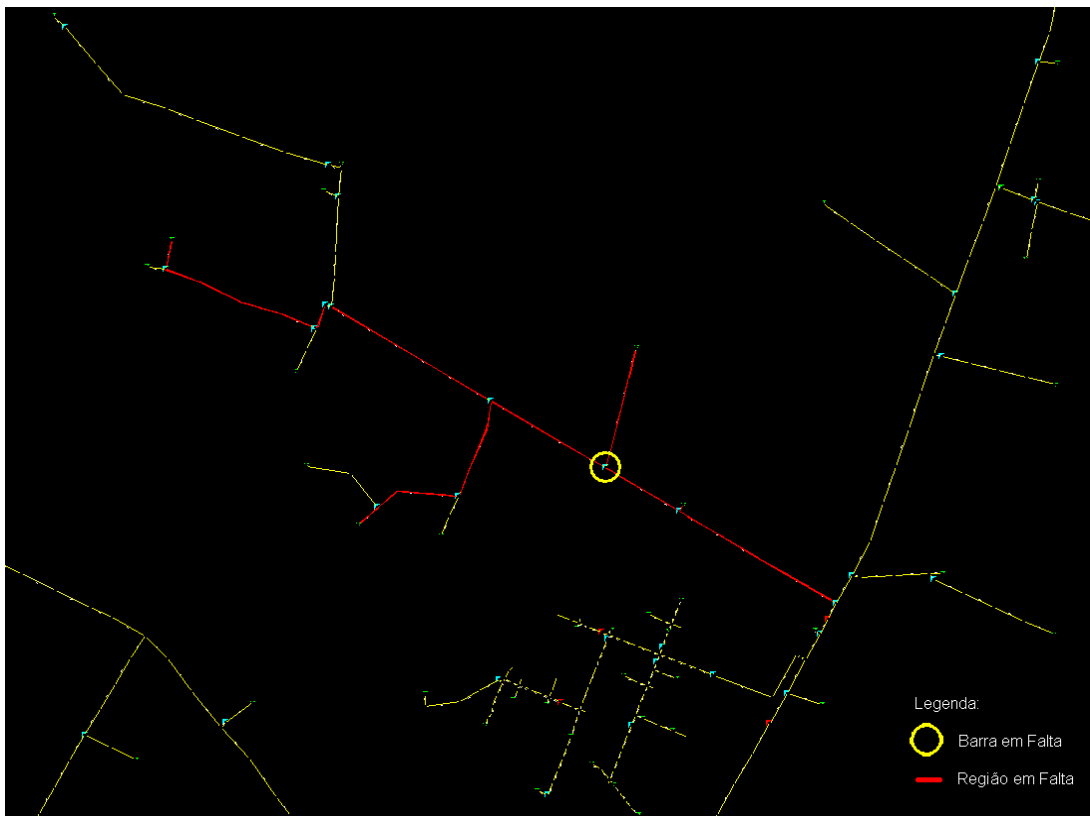
remotos do alimentador, efetuando com sucesso o processo de identificação do tipo de falta, de processamento digital dos sinais e de localização das faltas. Os resultados destes testes são apresentados a seguir, onde também se comparam os resultados das localizações de faltas obtidas através das duas configurações de medidores propostas.

### **Falta na Barra 853**

Para uma falta na barra 853 foram consideradas as seguintes condições testes:

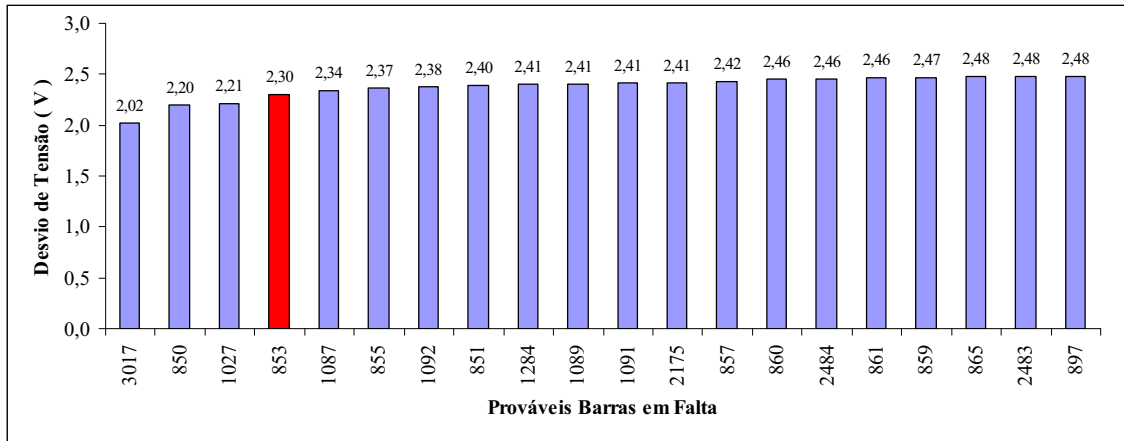
- Foi aplicada uma falta fase A;
- Resistência de falta fase-terra é igual a 31,161;

Na Figura 4.29 ilustram-se os trechos do alimentador com o ponto onde foi simulada a falta (círculo amarelo) e a região de localização da falta fornecida pelo algoritmo proposto (região dos 10 primeiros pontos localizados).

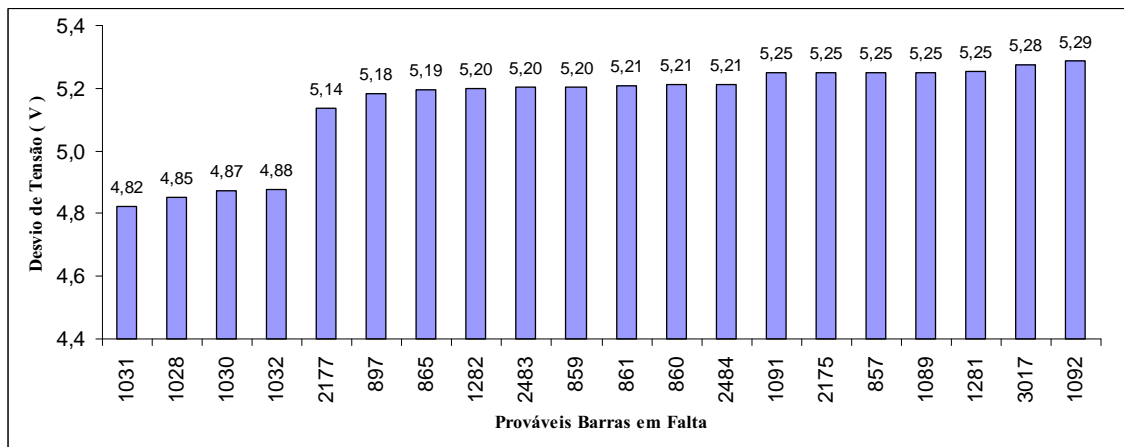


**Figura 4.29** Falta na barra 853 e provável região em falta. (região vermelha)

Na Figura 4.30 faz-se uma comparação entre os resultados obtidos pelo sistema de localização de faltas para a alocação de medidores proposta neste trabalho (4ª posição) e a alocação proposta de forma heurística (24ª posição).



(a) Alocação ótima proposta.



(b) Alocação de forma heurística.

**Figura 4.30** Classificação das prováveis barras sob falta para uma falta na barra 853.

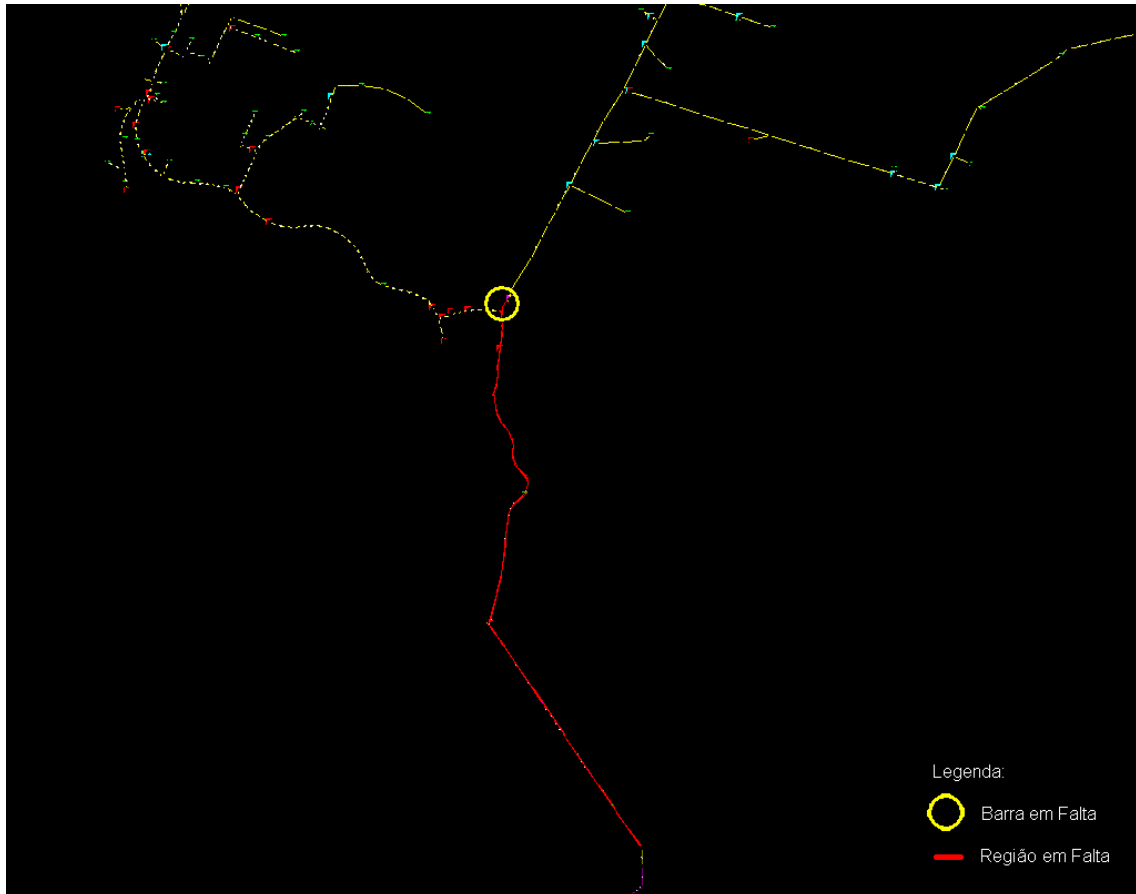
Com a alocação ótima dos medidores o sistema de localização de faltas identificou uma falta na barra 853, fase A, em quarta posição, como pode ser observado na Figura 4.30 . Já o sistema de localização, com a alocação dos medidores feita de forma heurística, classificou a barra em 24ª posição, o que demonstra uma grande melhoria quanto à localização e classificação das faltas.

### **Falta na Barra 2089**

Para uma falta na barra 2089 foram consideradas as seguintes condições testes:

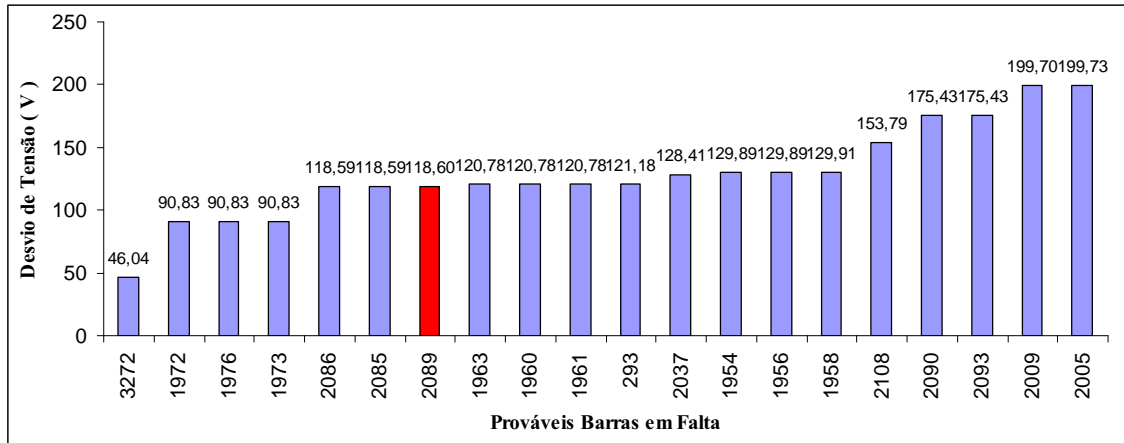
- Foi aplicada uma falta entre as fases A, B e C;
- Resistência de falta fase-terra é igual a 31,139;
- Resistência entre fases é igual a 0,581.

Na Figura 4.31 ilustram-se os trechos do alimentador com o ponto onde foi simulada a falta (círculo amarelo) e a região de localização da falta fornecida pelo sistema de localização de faltas (região dos 10 primeiros pontos localizados).

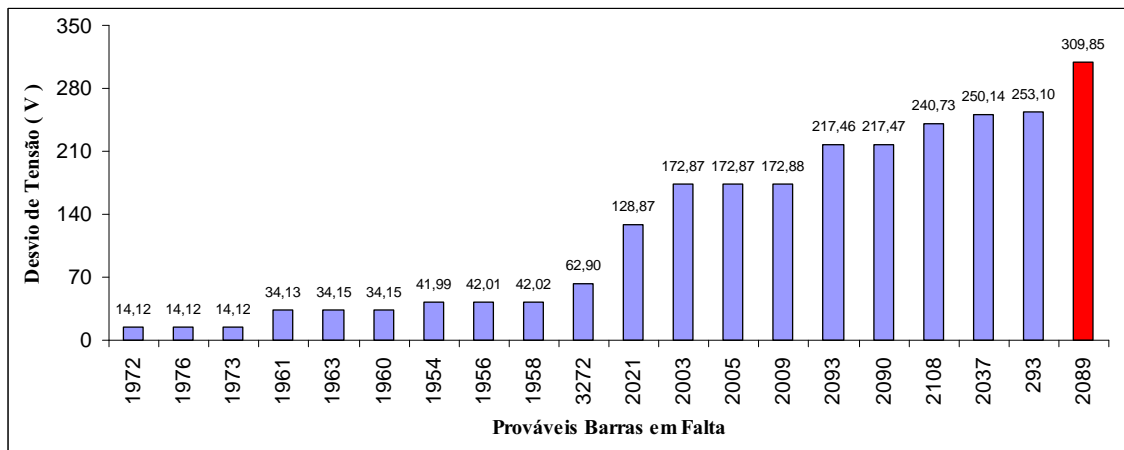


**Figura 4.31** Falta na barra 2089 e provável região em falta. (região vermelha)

Na Figura 4.32 faz-se uma comparação entre os resultados obtidos pelo sistema de localização de faltas para a alocação de medidores proposta neste trabalho (7ª posição) e a alocação proposta de forma heurística (20ª posição).



(a) Alocação ótima proposta.



(b) Alocação de forma heurística.

**Figura 4.32** Classificação das prováveis barras sob falta para uma falta na barra 2089.

Houve uma grande melhora na classificação das barras com a alocação otimizada dos medidores de tensão, passando-se da vigésima posição, para a sétima posição, como se pode observar na Figura 4.32 .

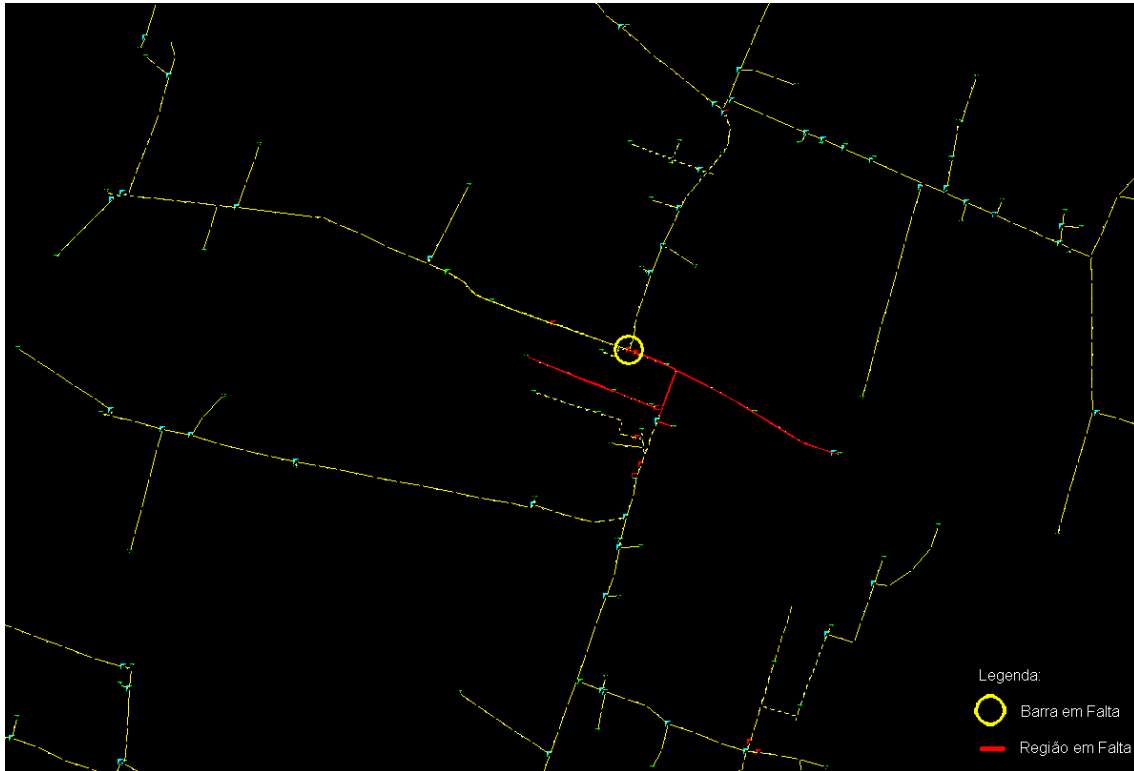
### **Falta na Barra 3058**

Para uma falta na barra 3058 foram consideradas as seguintes condições testes:

- Foi aplicada uma falta fase B;
- Resistência de falta fase-terra é igual a 26,704;

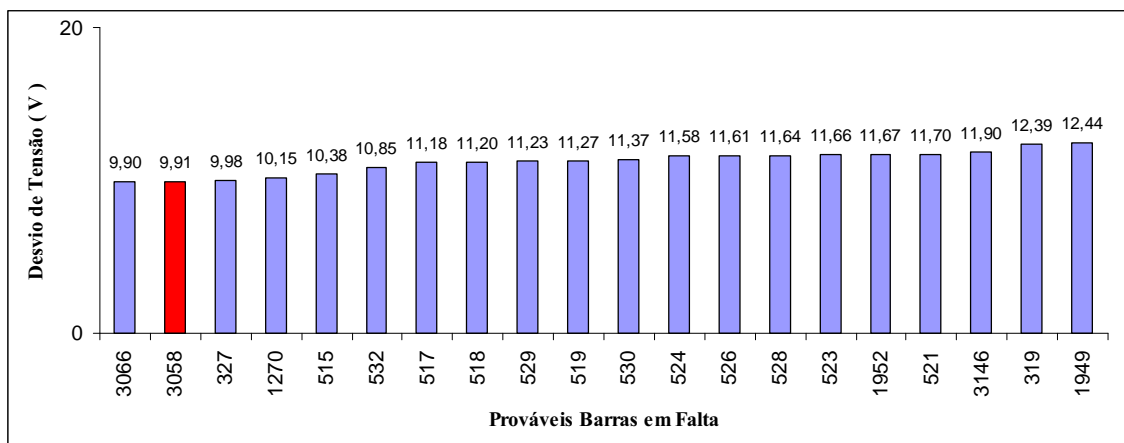


Na Figura 4.33 ilustram-se os trechos do alimentador com o ponto onde foi simulada a falta (círculo amarelo) e a região de localização da falta fornecida pelo algoritmo proposto (região dos 10 primeiros pontos localizados).

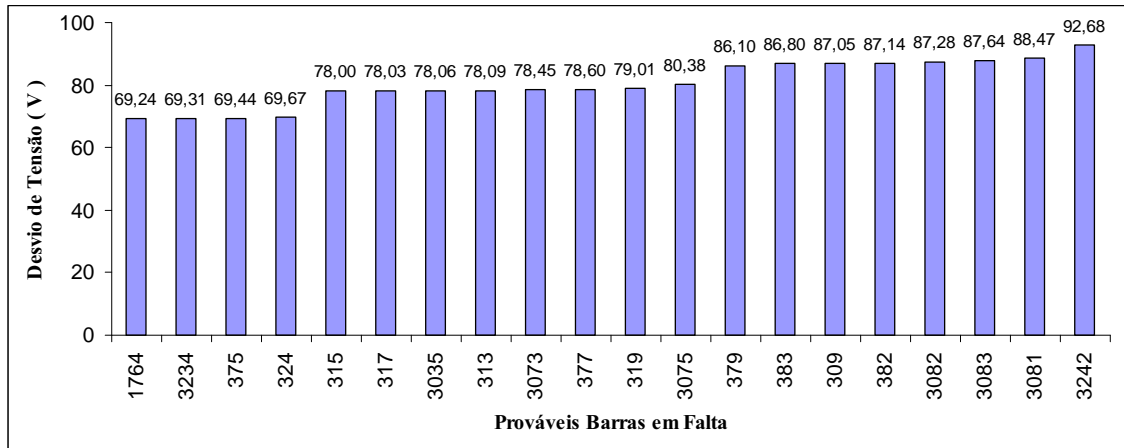


**Figura 4.33** Falta na barra 3058 e provável região em falta. (região vermelha)

Na Figura 4.34 faz-se uma comparação entre os resultados obtidos pelo sistema de localização de faltas para a alocação de medidores proposta neste trabalho (2ª posição) e a alocação proposta de forma heurística (43ª posição).



(a) Alocação ótima proposta.



(b) Alocação de forma heurística.

**Figura 4.34** Classificação das prováveis barras sob falta para uma falta na barra 3058.

Com a alocação ótima dos medidores o sistema de localização de faltas identificou uma falta na barra 3058, fase A, em segunda posição, como pode ser observado na Figura 4.34 . Já o sistema de localização, com a alocação dos medidores feita de forma heurística, classificou a barra em 43ª posição, o que demonstra uma grande melhoria quanto à localização e classificação das faltas.

### **Falta na Barra 3243**

Para uma falta na barra 3243 foram consideradas as seguintes condições testes:

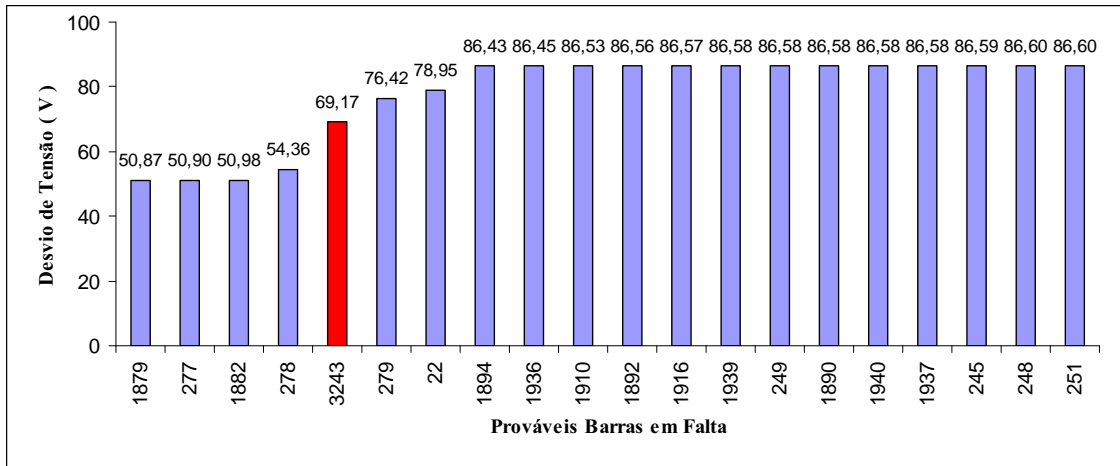
- Foi aplicada uma falta entre as fases A e C;
- Resistência de falta fase-terra é igual a 18,511;
- Resistência entre fases é igual a 0,773.

Na Figura 4.35 ilustram-se os trechos do alimentador com o ponto onde foi simulada a falta (círculo amarelo) e a região de localização da falta fornecida pelo algoritmo proposto (região dos 10 primeiros pontos localizados).

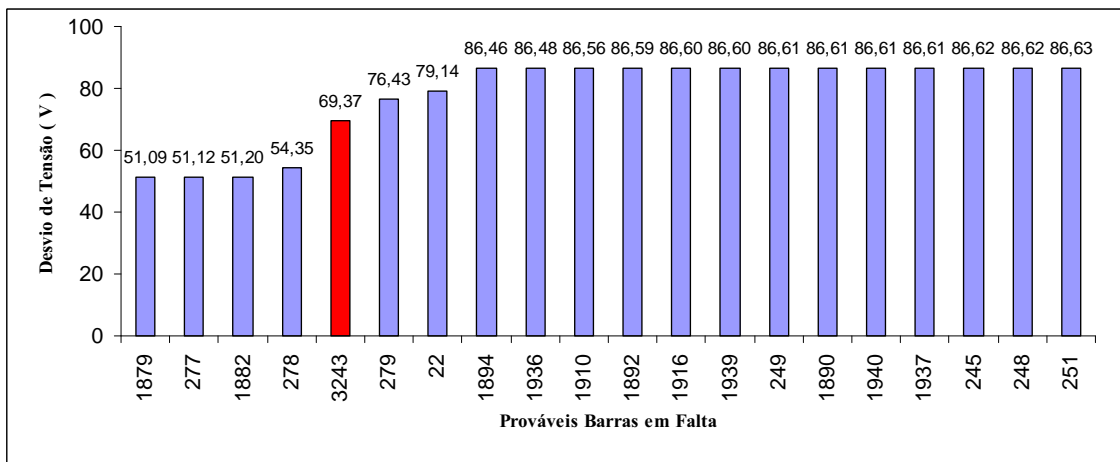


**Figura 4.35** Falta na barra 3243 e provável região em falta. (região vermelha)

Na Figura 4.36 faz-se uma comparação entre os resultados obtidos pelo sistema de localização de faltas para a alocação de medidores proposta neste trabalho (5ª posição) e a alocação proposta de forma heurística (5ª posição).



(a) Alocação ótima proposta.



(b) Alocação de forma heurística.

**Figura 4.36** Classificação das prováveis barras sob falta para uma falta na barra 3243.

Para uma falta entre as fases A e C na barra 3243, tanto a alocação ótima proposta através do modelo estocástico quanto a alocação realizada de forma heurística para os medidores obtiveram a mesma classificação para as prováveis barras em falta. Assim, para faltas nas proximidades de barra 3243, ambas as configurações apresentam bom desempenho na localização das faltas.

## **5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS**

---

Os resultados obtidos com a alocação otimizada dos medidores de tensão através da metodologia proposta mostram melhorias no desempenho do sistema de localização de faltas com o fornecimento de resultados mais precisos, reduzindo o erro na distância entre o verdadeiro local da falta e a indicação dada pelo algoritmo de localização de faltas. Verificou-se através dos resultados que a alocação otimizada fornece indicações da região de incidência das faltas com bom grau de precisão e segurança.

Embora tenha sido utilizado um algoritmo pré-estabelecido de localização de faltas (PEREIRA et al.,2008) como ferramenta auxiliar da metodologia proposta para a alocação otimizada dos medidores, esta metodologia é geral e pode ser utilizada para alocar medidores que detectam as magnitudes dos afundamentos de tensão para qualquer tipo de algoritmo de localização de falta que usa este tipo de informação.

A alocação dos medidores de tensão na rede pode ser usada adicionalmente para monitorar a qualidade do fornecimento de energia elétrica através da estimação do estado da rede. Desta forma, utilizando os dados fornecidos pelos medidores esparsos de tensão pode-se estimar as tensões das barras do sistema através de um algoritmo de fluxo de potência trifásico, considerando as barras onde estão localizados esses medidores como sendo do tipo tensão controlada. Quando o alimentador está sujeito a contingência, tem-se um mapeamento das regiões onde ocorrem problemas críticos de afundamentos de tensões.

Apesar do número de medidores estar presente no modelo de alocação otimizada, este modelo não garante a minimização do número de medidores porque os custos fixos devido à alocação destes 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 permitidos de ser alocado no alimentador. Outros fatores, tais como, locais onde não se podem instalar medidores e a consideração dos dados da taxa de falhas por km da rede de distribuição de energia elétrica podem ser incorporados na função objetivo desse modelo, bem como por meio de restrições físicas, operacionais ou econômicas.

Verifica-se através dos resultados apresentados nas Tabelas 4.4 e 4.8 a necessidade de melhorias no algoritmo GRASP e do modelo matemático proposto, com vistas a buscar eficiência da alocação otimizada para detectar com precisão todos os tipos de faltas em alimentadores de distribuição. Desta forma, futuros desenvolvimentos deste trabalho estão relacionados ao uso de diferentes estratégias de busca local do algoritmo GRASP como, por exemplo, *path relinking* ou busca de vizinhança variável. Para gerar a lista de candidatas deve ser pesquisada uma nova classificação das barras candidatas a fazer parte da solução do problema levando-se em conta não só a sensibilidade dos afundamentos de tensão, mas também o número de conexões das barras e dados históricos das taxas de falhas por unidade de comprimento do alimentador. Pesquisas com o modelo matemático devem ser considerados os componentes dos modernos sistemas de distribuição tais como geração distribuída, reguladores de tensão, bancos de capacitores fixos e chaveados e dispositivos de controle e proteção equipados com transmissão remota de dados.

## 6 REFERÊNCIAS

---

ABUR, A.; GALIJASEVIC, Z. Fault location using voltage measurements. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York, v.17, n.2, p.441 – 445, 2002.

BOLLEN, M. H. J. **Understanding power quality problems: voltage sags and interruptions**. New York: Wiley-IEEE, 1999. 672 p.

BOX, G.E.P.; MULLER, M.E. A note on the generation of random normal deviates. **The Annals of Mathematical Statistics**, Santa Monica, v.29, n.2, p.610-611, 1958.

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

CHO, K. S.; SHIN, J. R.; HYUN, S. H. Optimal placement of phasor measurement units with GPS receiver. **Power Engineering Society Winter Meeting**, Columbus, v. 1, n. 1, p. 258-262, 2001.

COATES, R. F. W.; JANACEK, G. J.; LEVER, K. V. Monte Carlo Simulation and Random Number Generation. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, New York, v.6, n.1, p.58-66, 1988.

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

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

DONGJIE, X.; RENMU, H.; PENG, W.; TAO, X. Comparison of several PMU placement algorithms for state estimation. In: IEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON DEVELOPMENTS IN POWER SYSTEM PROTECTION, 8, 2004. **Proceeding...** Stevenage: [s. n.], 2004. v. 1, p. 32-35, 2004.

EMBREE, P. M.; DANIELI, D. **C++ algorithm for digital signal processing**. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1999. p.331-402,

FEO, T. A.; RESENDE, M. G. C.. Greedy randomized adaptive search procedures. **Journal of Global Optimization**, Boston, v. 6, n. 1, p. 109-134, 1995.

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

GLOVER, F.; KOCHENBERGER, G. A. **Handbook of metaheuristics**. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2003. 557 p.

GOHOKAR, V. N.; KHEDKAR, M. K. Faults locations in automated distribution system. **Electric Power Systems Research**, Shegaon, v. 75, n. 1, p.51 – 55, 2005.

LI, H.; MOKHAR, A. S.; JENKINS, N. Automatic fault location on distribution network using voltage sags measurements. In: INTERNATIONAL CONFERENCE AND



EXHIBITION ON ELECTRICITY DISTRIBUTION - CIRED, 18, 2005. **Proceeding...**Turin: [s. n.], 2005. v. 3, p. 1-4.

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

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

PEREIRA, R. A. F.; DA SILVA, L. G. W.; MANTOVANI, J. R. S. Algoritmo baseado em afundamentos de tensão para localização de faltas em alimentadores de distribuição de energia elétrica, **Sba Controle & Automação**, Campinas, v.19, n.3, p.337-349, 2008. Disponível em: < <http://www.dee.feis.unesp.br/lapsee/papers/SBA-Afundamentos-Pereira.pdf> >. Acesso em: 16 out. 2007.

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

PEREIRA, R. A.; SILVA, L. G. W.; KEZUNOVIC, M.; MANTOVANI, J. R. S. Optimized placement of voltage measurement devices for detecting location of single line-to –ground faults on overhead electric power distribution feeders. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, 16, 2006, Salvador. **Anais...** Salvador: [s. n.], 2006. p. 1225-1230.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. Estabelece as disposições relativas à conformidade dos níveis de tensão de energia elétrica em regime permanente. Resolução n. 505, de 26 de novembro de 2001. **Diário Oficial da União**: República Federativa do Brasil: Poder Legislativo, 16 jan. 2004. Col. 1, p. 43.

Disponível em < [www.aneel.gov.br/cedoc/res2001505.pdf](http://www.aneel.gov.br/cedoc/res2001505.pdf) >. Acesso em: 13 nov. 2008.

PROCEDIMENTOS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO SISTEMA ELÉTRICO NACIONAL – PRODIST. Dispõe sobre as normas que disciplinam o relacionamento entre as distribuidoras de energia elétrica e demais agentes (unidades consumidoras e centrais geradores) conectados aos sistemas de distribuição. Resolução n. 345, de 16 de dezembro de 2008. **Diário Oficial da União**: República Federativa do Brasil: Poder Legislativo, 31 dez. 2008. Col. 1, p. 182.

Disponível em: < [http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Modulo1\\_Revisao\\_0.pdf](http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Modulo1_Revisao_0.pdf) >. Acesso em 18 fev. 2009.

SOUZA, D. M. B. S.; ASSIS, A. F.; SILVA, I. N.; USIDA, W. F. Efficient fuzzy approach for allocating fault indicators in power distribution lines. **Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America, IEEE/PES**, Bogota, v.1, n. 1, p. 1-6, 2008.

SPIEGEL, M. R. **Estatística**. 3.ed. São Paulo: Makron Books, 1993. 643 p.

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**, New York, v. 21, n. 3, p. 1641–1674, 2006.

## **Apêndice A – Dados do Alimentador 1**

Conforme mencionado no capítulo 4, os testes realizados para o sistema 1 utilizaram um alimentador de distribuição trifásico real, com 134 barras, tensão nominal de 13,8 kV e potência nominal de 7,065 MVA. A topologia deste sistema está ilustrada na Figura 4.3 . A Tabela A.1 apresenta a capacidade total, incluindo a capacidade reserva de cada alimentador vizinho. As matrizes de impedâncias de rede para cada trecho do alimentador estão representadas após os dados do alimentador.

A Tabela A.2 contém os dados do alimentador, com as seções de linhas e seus comprimentos, tamanho dos condutores e cargas conectadas, sendo que as potências especificadas estão conectadas às barras da coluna definida como “Nó Final”.

**Tabela A.1** Capacidade dos alimentadores vizinhos (incluindo capacidade reserva).

<b>Capacidade dos Alimentadores (kVA)</b>	
2	1.910,00
3	12.170,00
4	2.750,00
5	3.190,00
6	1.603,00
7	7.302,00
8	1.800,00

Tabela A.2 Dados do Alimentador.

Nó Inicial	Nó Final	Distância (m)	Bitola do Condutor	Potência (kVA)	Nó Inicial	Nó Final	Distância (m)	Bitola do Condutor	Potência (kVA)
0	1	-----	-----	-----	38	40	100,0	#4/0	0
1	2	900,0	#4/0	0	40	41	60,0	#4	75
2	3	50,0	#2	45	40	42	50,0	#4	75
2	4	100,0	#4/0	0	42	43	10,0	#4	75
4	5	40,0	#4/0	75	40	44	30,0	#4/0	112,5
5	6	200,0	#4/0	75	44	45	40,0	#4/0	45
6	7	200,0	#4/0	112,5	38	46	60,0	#4/0	1
7	8	200,0	#4/0	75	46	47	20,0	#4/0	112,5
8	9	10,0	#4/0	75	47	48	120,0	#4/0	0
9	10	50,0	#4/0	0	48	49	50,0	#4/0	112,5
10	11	100,0	#4	0	49	50	20,0	#4/0	75
11	12	60,0	#4	8,6	50	51	170,0	#4/0	112,5
12	13	30,0	#4	75	48	52	100,0	#4/0	0
13	14	160,0	#4	75	52	53	60,0	#4	1,2
11	15	30,0	#4	112,5	53	54	30,0	#4	112,5
15	16	10,0	#4	45	54	55	130,0	#4	75
16	17	20,0	#4	112,5	52	56	20,0	#4	75
17	18	40,0	#4	0	56	57	80,0	#4	0
18	19	40,0	#2	75	57	58	50,0	#2	10
19	20	50,0	#2	112,5	57	59	60,0	#2	112,5
18	21	150,0	#2	112,5	59	60	20,0	#2	3,8
10	22	30,0	#4/0	112,5	48	61	40,0	#4/0	3
22	23	70,0	#4/0	0	61	62	10,0	#4/0	5,5
23	24	50,0	#4	3	62	63	50,0	#4/0	0
24	25	20,0	#4	45	63	64	30,0	#1/0	75
25	26	30,0	#4	0	64	65	20,0	#1/0	75
26	27	60,0	#2	112,5	65	66	30,0	#1/0	3,5
27	28	40,0	#2	0	66	67	20,0	#1/0	0
28	29	20,0	#2	75	67	68	30,0	#4	112,5
29	30	120,0	#2	112,5	67	69	20,0	#4	7
28	31	20,0	#2	112,5	69	70	20,0	#4	112,5
26	32	20,0	#4	112,5	67	71	50,0	#1/0	75
32	33	5,0	#4	112,5	71	72	40,0	#1/0	8,5
33	34	25,0	#4	112,5	72	73	40,0	#1/0	1,9
23	35	10,0	#4/0	0	73	74	20,0	#1/0	112,5
35	36	70,0	#4/0	12,4	74	75	110,0	#1/0	112,5
36	37	10,0	#4/0	112,5	63	76	20,0	#4/0	112,5
37	38	10,0	#4/0	0	76	77	30,0	#4/0	5,9
38	39	70,0	#4/0	3	77	78	50,0	#4/0	0

Continua...

78	79	70,0	#4/0	75	105	106	210,0	#1/0	108,5
79	80	70,0	#4/0	112,5	106	107	30,0	#1/0	0
80	81	30,0	#4/0	112,5	107	108	100,0	#1/0	0
81	82	30,0	#4/0	0	108	109	100,0	#4	108,5
82	83	50,0	#4	75	109	110	30,0	#4	112,5
82	84	50,0	#4/0	75	110	111	20,0	#4	112,5
84	85	30,0	#4/0	112,5	107	112	170,0	#4/0	75
85	128	20,0	#4/0	0	112	113	110,0	#4/0	0
128	86	30,0	#4/0	15,5	113	114	110,0	#4	0
86	87	20,0	#4/0	75	113	115	200,0	#4	30
78	88	130,0	#2	75	115	116	200,0	#4	30
78	89	50,0	#4/0	75	116	117	200,0	#4	30
89	90	50,0	#4/0	0	117	118	200,0	#4	30
90	91	180,0	#4/0	45	90	119	110,0	#2	0
91	92	20,0	#4/0	0	119	120	70,0	#4/0	0
92	93	30,0	#2	112,5	120	121	70,0	#4/0	30
92	94	70,0	#2	23,5	119	122	70,0	#2	55
92	95	100,0	#4/0	0	122	123	130,0	#4	0
95	96	40,0	#2	75	123	124	20,0	#4	15,5
95	97	50,0	#2	6	123	125	20,0	#4	15,5
97	98	60,0	#2	0	125	126	40,0	#4	45
98	99	110,0	#4	23,5	126	127	40,0	#4	112,5
98	100	40,0	#2	75	128	129	60,0	#2	45
100	101	110,0	#2	112,5	104	130	70,0	#1/0	0
95	102	60,0	#4/0	112,5	130	131	20,0	#4/0	112,5
102	103	40,0	#4/0	0	130	132	100,0	#1/0	0
103	104	30,0	#1/0	75	132	133	40,0	#1/0	112,5
103	105	150,0	#1/0	75	133	134	40,0	#1/0	112,5

Fonte: [http://www.dee.feis.unesp.br/lapsee/TestSystems/135\\_bus\\_feeder.pdf](http://www.dee.feis.unesp.br/lapsee/TestSystems/135_bus_feeder.pdf)

As matrizes de impedâncias de rede para as várias seções do alimentador 1 são:

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

$$[Z_{0-1}] = \begin{bmatrix} 0,1960+j0,530 & 0,1960+j0,530 & 0,290+j1,920 \\ 0,1960+j0,530 & 0,2900+j1,920 & 0,196+j0,530 \\ 0,2900+j1,920 & 0,1960+j0,530 & 0,1960+j0,530 \end{bmatrix} [\Omega]$$

Seção dos condutores de bitola #2:

$$[Z_{\#2}] = \begin{bmatrix} 1,084+j0,998 & 0,0600+j0,478 & 0,060+j0,450 \\ 0,060+j0,478 & 1,0840+j0,998 & 0,060+j0,536 \\ 0,060+j0,450 & 0,0600+j0,536 & 1,084+j0,998 \end{bmatrix} [\Omega/\text{Km}]$$

Seção dos condutores de bitola #4:

$$[Z_{\#4}] = \begin{bmatrix} 1,644+j1,006 & 0,060+j0,4780 & 0,060+j0,450 \\ 0,060+j0,478 & 1,644+j1,0060 & 0,060+j0,536 \\ 0,060+j0,450 & 0,060+j0,5360 & 1,644+j1,006 \end{bmatrix} [\Omega/\text{Km}]$$

Seção dos condutores de bitola #1/0:

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

Seção dos condutores de bitola #4/0:

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