Universidade de São Paulo

Douglas Pinto Sampaio Gomes

**Metodologia e Simplificação do Espaço de Busca
para a Alocação de Medidores de Qualidade da
Energia Elétrica frente às Variações de Tensão de
Curta Duração**

São Carlos

2016

Douglas Pinto Sampaio Gomes

**Metodologia e Simplificação do Espaço de Busca
para a Alocação de Medidores de Qualidade da
Energia Elétrica frente às Variações de Tensão de
Curta Duração**

**Dissertação de Mestrado apresentada ao
Programa de Engenharia Elétrica da Escola de
Engenharia de São Carlos como parte dos
requisitos para a obtenção do título de Mestre
em Ciências.**

**Área de Concentração: Sistemas Elétricos de Potência
Orientador: Prof. Dr. Mário Oleskovicz**

São Carlos

2016

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

P633m Pinto Sampaio Gomes, Douglas
Metodologia e Simplificação do Espaço de Busca para a Alocação de Medidores de Qualidade da Energia Elétrica frente às Variações de Tensão de Curta Duração / Douglas Pinto Sampaio Gomes; orientador Mário Oleskovicz. São Carlos, 2016.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Área de Concentração em Sistemas Elétricos de Potência -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2016.

1. Alocação de Monitores de Qualidade da Energia Elétrica. 2. Sistemas de Distribuição. 3. Variação de Tensão de Curta Duração. 4. Metodologia Simplificada. 5. Monte Carlo. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **DOUGLAS PINTO SAMPAIO GOMES**.

Título da dissertação: "Metodologia e simplificação do espaço de busca para a alocação de medidores de qualidade da energia elétrica frente às variações de tensão de curta duração".

Data da defesa: 28/06/2016

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Associado **Mario Oleskovicz (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADO

Prof. Dr. **Carlos Frederico Meschini Almeida**
(Escola Politécnica/EP-USP)

APROVADO

Profª. Drª. **Fernanda Caseño Trindade Arioli**
(Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP)

APROVADO

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica:
Prof. Associado **Luis Fernando Costa Alberto**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Associado **Luis Fernando Costa Alberto**

Trata-se da versão corrigida da dissertação. A versão original se encontra disponível na EESC/USP que aloja o Programa de Pós-Graduação de Engenharia Elétrica.

Dedicatória

Dedico este trabalho a única pessoa que nunca me abandonou, que me deu seu amor e apoio incondicional, sacrificou tudo em prol da minha educação e é responsável por todas as minhas conquistas, minha mãe, Dulce.

Agradecimentos

A minha mãe Dulce, por todo amor, apoio e confiança.

Aos companheiros de república, Rodolfo Rocha, Carlos Matheus e Wiliam Pereira, pelas experiências vividas juntas, cooperação e presente amizade.

A minha namorada, Elise Schweig, pelo indiscutível companheirismo, apoio, amor, constante presença e incansável motivação.

A minha família, por reforçarem minhas convicções e por me darem acolhimento e ânimo a cada regresso.

Ao Professor Mário Oleskovicz pela confiança em me aceitar como orientado, por sua orientação, sugestões e conselhos durante todo o mestrado. Aos Professores José Carlos e Denis Coury pelos conselhos, apoio e partilha do saber.

Aos amigos e companheiros de trabalho, Eduardo Gomes, Fabricio Mourinho, Aline Nonato e Thais Kempner por toda ajuda e colaboração no desenvolvimento desta pesquisa. Amigos de São Carlos, Marília Venega, Mauri Gabriel, Cristina Lopes, Antonio Mukita, Daiana Santos, Alexandre Festa e Daniel Lima, pelo companheirismo e amizade. Assim como, todos os amigos que, mesmo distantes, expressaram seu suporte e afeto durante este período, em especial a Thalia Martins, Vinícius Cafisso, Humberto e Brisa Xavier e Willian Araújo.

A todos os companheiros do LSEE (Laboratório de Sistemas de Energia Elétrica) por deixarem a experiência de trabalho mais divertida e enriquecedora.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) devido ao apoio financeiro concedido ao desenvolvimento deste mestrado, e à Eletrobrás Distribuição Piauí (PD-0042/2014-ANEEL) pelo suporte complementar disponibilizado em um período específico do trabalho.

Maynard James Keenan

Resumo

Gomes, D. P. S. **Metodologia e Simplificação do Espaço de Busca para a Alocação de Medidores de Qualidade da Energia Elétrica frente às Variações de Tensão de Curta Duração**. 2016. 140 p. Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

A presente pesquisa tem como tema principal a alocação otimizada de Monitores de Qualidade da Energia Elétrica (MQEEs) em sistemas de distribuição para a observação das Variações de Tensão de Curta Duração (VTCDs). Busca-se pela pesquisa apresentar adequações que podem ser facilmente incorporadas aos métodos de alocação que se baseiam no uso de algoritmos inteligentes, neste caso em específico, em Algoritmos Genéticos (AGs), para resolver o problema da alocação de MQEEs. Também como contribuição, a pesquisa apresenta uma técnica para a diminuição do espaço de busca das soluções, imprimindo assim, uma melhoria da observação das VTCDs em Sistemas de Distribuição (SDs), e caracterizando um método simplificado para a alocação desejada. A metodologia como formulada (via AG e método simplificado) foi testada através da sua aplicação nos sistemas de distribuição de 13, 34 e 123 nós, simulados via o ATP (*Alternative Transients Program*), e provindos da base de dados do IEEE (*Institute of Electrical and Electronic Engineers*). A pesquisa também foi testada considerando um alimentador real de uma concessionária regional, e validada através de simulações estatísticas pelo Método de Monte Carlo.

Palavras-Chave: Alocação de Monitores de Qualidade da Energia Elétrica, Sistemas de Distribuição, Variação de Tensão de Curta Duração, Metodologia Simplificada, Monte Carlo.

Abstract

Gomes, D. P. S. **Methodology and Simplification of the Search Space for Power Quality Monitor Allocation facing Voltage Variations**. 2016. 140 p. Masters Dissertation – Engineering School of São Carlos, University of São Paulo, São Carlos.

The present research has the optimized allocation of Power Quality Monitors in distribution systems as its main subject aimed at voltage sags and swells observation. The work intention is to propose adjustments that can be easily incorporated into the allocation methods based on the use of intelligent algorithms, in this case specifically, the Genetic Algorithms addressing the problem of monitor allocation. Also, as contribution, the research presents a technique to reduce the search space of solutions, thus printing an improvement on the observation of voltage variations in distribution systems and characterizing a simplified method for the desired allocation. The methodology, as formulated (by the genetic algorithm application and the simplified method), was tested through its application in distribution systems of 13, 34 and 123 nodes, simulated on ATP (Alternative Transients Program), and stemmed by the IEEE database (Institute of Electrical and Electronic Engineers). The research was also tested considering a real feeder of a regional utility, and validated through statistical simulations by the Monte Carlo method.

Keywords: Power Quality Monitor Allocation, Distribution Systems, Voltage Sags, Simplified Methodology, Monte Carlo.

Lista de Siglas e Abreviaturas

AG	Algoritmos Genéticos
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ATP	<i>Alternative Transients Program</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i>
MMC	Método de Monte Carlo
MCo	Matriz de Cobertura
MH	Método Híbrido
MQEE	Monitor de Qualidade da Energia Elétrica
MTC	Matriz Topológica de Cobertura
MGC	Matriz Genérica de Cobertura
MTDF	Matriz de Tensões Durante a Falta
OEP	Otimização por Enxame de Partículas
PES	<i>Power & Energy Society</i>
PQM	<i>Power Quality Monitor</i>
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
QEE	Qualidade da Energia Elétrica
RMS	<i>Root Mean Square</i>
SD	Sistema de Distribuição
SEP	Sistema Elétrico de Potência
TS	<i>Tabu Search</i>
VA	Vetor Alocação
VTCD	Variação de Tensão de Curta Duração

Lista de Figuras

Figura 4.1 – Metodologia adotada no presente trabalho	53
Figura 4.2 - Sistema elétrico exemplo representado na interface gráfica ATPDraw.	54
Figura 4.3 - Simulação de uma falta genérica na fase C do SEP anteriormente apresentado.....	58
Figura 4.4 – Sistema exemplo de distribuição de 6 nós.	60
Figura 4.5 – Processo de cruzamento pelo método de único ponto entre dois indivíduos.....	76
Figura 5.1 – Espaçamento das linhas aéreas..	89
Figura 5.2 – Espaçamento das linhas subterrâneas trifásicas e bifásicas.	89
Figura 5.3 – Diagrama unifilar do sistema de 13 nós	93
Figura 5.4 – Sistema de 13 nós modelado via a interface do software ATPDraw.	96
Figura 5.5 – Diagrama unifilar do sistema de 34 nós.	97
Figura 5.6 – Sistema de 34 nós modelado via a interface do software ATPDraw.	98
Figura 5.7 – Diagrama unifilar do sistema de 123 barras.....	100
Figura 5.8 - Sistema de 123 nós modelado via a interface do software ATPDraw.	101
Figura 5.9 – Esquema unifilar do SD real analisado.	103
Figura 5.10 – SD real modelado via a interface do software ATPDraw.....	104
Figura 6.1 – Alocação dos MQEEs no sistema de 34 nós.	107
Figura 6.2 - Ilustração do esquema de alocação dos MQEEs no sistema de 34 nós dada a MGC de 0,9-0,7 p.u.....	109
Figura 6.3 - Alocação dos MQEEs no sistema de 34 nós dada a MGC para limiares entre 0,9-0,6 p.u.	111
Figura 6.4 - A alocação dos MQEEs no sistema de 34 nós dada para a MGC com limiares entre 0,9-0,5 p.u.	113
Figura 6.5 - Alocação dos MQEEs no sistema de 13 nós.	116

Figura 6.6 - Alocação dos monitores no sistema de 13 nós dada a MGC de 0,9 a 0,5 p.u.....	118
Figura 6.7 - Alocação dos MQEEs no sistema de 123 nós.	120
Figura 6.8 - Alocação dos MQEEs no sistema de 123 nós dada a MGC de 0,9 e 0,8 p.u.....	121
Figura 6.9 - Alocação dos monitores no sistema de 123 nós dada a MGC para limiares entre 0,9 e 0,7 p.u.	122
Figura 6.10 - Alocação dos MQEEs no sistema de 123 nós dada a MGC para limiares entre 0,9 e 0,6 p.u.	123
Figura 6.11 - Alocação dos MQEEs no sistema de 123 nós dada a MGC para limiares entre 0,9 e 0,5 p.u.	124
Figura 6.12 – Alocação dos MQEEs no sistema de distribuição real para um limiar de 0,9 p.u.....	127
Figura 6.13 - Alocação dos MQEEs no sistema de distribuição real dada a MTC com resistências de falta diminuídas em 5 Ω	129
Figura 6.14 - Alocação dos MQEEs no sistema de distribuição real dada a MTC com resistências de falta diminuídas em 10 Ω	130

Lista de Tabelas

Tabela 4.1 – MTDF do sistema exemplo para faltas francas.	60
Tabela 4.2 – MCo para o sistema exemplo.	61
Tabela 4.3 – Representação da MTC do sistema exemplo apresentado.	63
Tabela 4.4 – MTC construída com a restrição sugerida.	66
Tabela 4.5 – Representação da MTC do sistema exemplo com um limiar de tensão estabelecido em 0,7 p.u.	68
Tabela 4.6 - MTDF do sistema exemplo considerando uma falta monofásica com resistência de falta.	70
Tabela 4.7 – MGC do sistema teste de 34 nós com um limiar de tensão de 0,7 a 0,9 p.u.	82
Tabela 4.8 – Parte da MGC resultante da aplicação do passo 2 do método simplificado.	84
Tabela 5.1 – Dados dos condutores utilizados para caracterizar as linhas aéreas.	90
Tabela 5.2 – Cabos concêntricos de neutro, 15 kV, alumínio (AA).	90
Tabela 5.3 – Cabo blindado, 15 kV, alumínio (AA).	91
Tabela 5.4 – Configurações das linhas do sistema de 13 nós.	94
Tabela 5.5 – Dados dos segmentos das linhas.	94
Tabela 5.6 – Dados dos bancos de capacitores do sistema de 13 nós.	94
Tabela 5.7 – Dados das cargas concentradas.	95
Tabela 5.8 – Dados da cargas distribuídas.	95
Tabela 5.9 – Segmentos das linhas do sistema de 34 nós.	99
Tabela 5.10 - Segmentos das linhas do sistema de 123 nós.	102
Tabela 6.1 – MTC do sistema de 34 nós com um limiar de 0,9 p.u.	106
Tabela 6.2 – Esquema de alocação para o sistema de 34 nós com um limiar de 0,9 p.u.	107
Tabela 6.3 - Esquema de alocação para o sistema de 34 nós com limiares de 0,9 p.u. a 0,7 p.u.	109

Tabela 6.4 - MGC do sistema de 34 nós com limiares entre 0,9 e 0,6 p.u.	110
Tabela 6.5 - Alocação de MQEEs para o sistema de 34 nós com limiares entre 0,9 p.u. e 0,6 p.u.	110
Tabela 6.6 - MGC do sistema de 34 nós para limiares entre 0,9 e 0,5 p.u. ...	112
Tabela 6.7 - Alocação para o sistema de 34 nós com limiares entre 0,9 p.u. e 0,5 p.u.	112
Tabela 6.8 - Alocação para o sistema de 34 nós com limiares entre 0,9 p.u. e 0,5 p.u. considerando o Método Simplificado.	114
Tabela 6.9 - MTC do sistema de 13 nós com um limiar de 0,9 p.u.	116
Tabela 6.10 - Alocação de MQEEs para o sistema de 13 nós para um limiar de 0,9 p.u.	116
Tabela 6.11 - MGC do sistema de 13 nós para um limiar entre 0,9 e 0,5 p.u.	117
Tabela 6.12 - Alocação para o sistema de 13 nós para limiares entre 0,9 e 0,5 p.u.	118
Tabela 6.13 - MTC do sistema de 123 nós para um limiar de 0,9 p.u.	119
Tabela 6.14 - Alocação dos MQEEs para o sistema de 123 nós para o limiar de 0,9 p.u.	120
Tabela 6.15 - Alocação para o sistema de 123 nós para os limiares de 0,9 p.u. e 0,8 p.u.	121
Tabela 6.16 - Alocação para o sistema de 123 nós com limiares entre 0,9 p.u. e 0,7 p.u.	122
Tabela 6.17 - Alocação para o sistema de 123 nós para limiares entre 0,9 p.u. e 0,6 p.u.	123
Tabela 6.18 - Alocação dos MQEEs para o sistema de 123 nós com limiares entre 0,9 p.u. e 0,5 p.u.	124
Tabela 6.19 – Eficiência estimada da alocação para os diferentes casos adotados	125
Tabela 6.20 - Alocação dos MQEEs para o sistema de distribuição real nós para um limiar de 0,9 p.u.	127
Tabela 6.21 - Alocação dos MQEEs para o sistema de distribuição real com resistências de faltas diminuídas em 5 Ω	128
Tabela 6.22 – Alocação para o sistema de distribuição real com as resistências de faltas diminuídas em 10 Ω	129

Sumário

Dedicatória.....	vii
Agradecimentos	ix
Epígrafe.....	xi
Resumo	xiii
Abstract.....	xv
Lista de Siglas e Abreviaturas	xvii
Lista de Figuras.....	xix
Lista de Tabelas	xxi
Sumário.....	23
1 Introdução.....	25
1.1 Objetivos	30
1.2 Contribuições	31
1.3 Estrutura do trabalho.....	32
2 Referencial Teórico	35
2.1 Variações de Tensão de Curta Duração	35
2.2 Ferramentas Utilizadas	37
2.2.1 Algoritmos Genéticos	38
2.2.2 Simulação de Monte Carlo	40
3 Levantamento Bibliográfico	43
3.1 Minimização da Ambiguidade de Monitoramento dos Sistemas Elétricos.....	43
3.2 Observação das VTCDs.....	45
4 Metodologia	51
4.1 Aquisição dos dados do sistema elétrico	52
4.2 Modelagem computacional	54
4.3 Simulação de faltas	55
4.4 Construção da Matriz de Tensão Durante a Falta e Matrizes de Cobertura	
58	
4.4.1 Matriz de Tensão Durante a Falta	59
4.4.2 Matriz de Cobertura.....	59
4.4.3 Matriz Topológica de Cobertura	62

4.4.4	<i>Matriz Topológica de Cobertura Sugerida</i>	64
4.4.5	<i>A consideração de diferentes limiares de tensão</i>	66
4.4.6	<i>Matriz Genérica de Cobertura</i>	69
4.4.7	<i>Aumento da área classificada como afetada</i>	71
4.5	Algoritmo genético	73
4.5.1	<i>Função avaliação e objetivo</i>	74
4.6	Método de Monte Carlo	78
4.7	Método simplificado	80
4.8	Considerações Finais	85
5	Sistemas Elétricos Analisados	87
5.1	Modelagem dos componentes	87
5.1.1	<i>ATP e ATPDraw</i>	87
5.1.2	<i>Cargas</i>	88
5.1.3	<i>Banco de capacitores</i>	88
5.1.4	<i>Modelos de linhas</i>	89
5.1.5	<i>Reguladores de tensão</i>	91
5.1.6	<i>Transformadores</i>	92
5.2	Sistema de 13 nós	92
5.2.1	<i>Dados das linhas</i>	93
5.2.2	<i>Dados dos capacitores</i>	94
5.2.3	<i>Dados das cargas</i>	95
5.3	Sistema de 34 nós	96
5.4	Sistema de 123 nós	99
5.5	Sistema de Distribuição Real	103
6	Resultados	105
6.1	Sistema de Distribuição de 34 nós	105
6.1.1	<i>Alocação dos MQEEs via AG</i>	105
6.1.2	<i>Alocação dos MQEEs via o Método Simplificado</i>	113
6.1.3	<i>Validação da alocação dos MQEEs via o MMC</i>	114
6.2	Sistema de Distribuição de 13 nós	115
6.3	Sistema de Distribuição de 123 nós	119
6.4	Sistema de Distribuição Real	126
7	Conclusões	133
8	Referências Bibliográficas	137

1 Introdução

No cenário contemporâneo do setor elétrico, fatores como a disponibilidade, confiabilidade e qualidade da energia elétrica são muito importantes. O principal motivo, dentre os diversos causadores desse fato, está na mudança do perfil de carga dos consumidores finais nas últimas décadas. Baseados em dispositivos semicondutores e/ou controlados por microprocessadores, o aumento da presença de equipamentos eletrônicos na indústria moderna, fez com que esses se tornassem maioria no perfil das cargas industriais, os quais são dispositivos altamente sensíveis aos distúrbios passíveis de ocorrência sobre os Sistemas Elétricos de Potência (SEPs). Consequentemente, as causas e níveis de distúrbios elétricos tornam-se os principais objetivos para pesquisadores garantirem uma boa qualidade da energia em Sistemas de Distribuição (SDs) de energia elétrica.

Sendo assim, sistemas de monitoramento de Qualidade da Energia Elétrica (QEE) tornam-se o primeiro passo para estimar, assegurar e melhorar o nível do produto oferecido das distribuidoras (Ibrahim, et al., 2010). Como encontrado em Almeida e Kagan (2009), tais sistemas podem auxiliar na resolução de conflitos entre consumidores e concessionárias que possam resultar em penalidades por transgressões dos limites regulamentados para fenômenos de qualidade da energia, como também na garantia da qualidade do produto fornecido por estas empresas, já que a competitividade no setor elétrico tende a aumentar, uma vez que a eletricidade é vista cada vez mais como um “produto comercial” que não deve somente ser avaliado pela sua confiabilidade (em função da frequência das interrupções no serviço), mas também pela qualidade da tensão fornecida.

Um sistema de monitoramento de QEE detecta e analisa eventos relacionados a distúrbios na qualidade da energia. Segunda Won et al. (2002), podem-se definir três tipos de equipamentos de aquisição de dados para tais sistemas: medidor, analisador e monitor.

- O medidor é o mais simples deles. É portátil e eventualmente faz a aquisição dos dados instantâneos de tensão, corrente e potência RMS em alguns pontos do sistema;
- O analisador geralmente não é instalado permanentemente, mede os mesmos dados do medidor, mas faz análises de harmônicos e detecção de eventos de QEE; e
- Os monitores, por outro lado, são de instalação permanente e coletam os dados de forma contínua para estudos da QEE.

No presente trabalho, considera-se que Monitores de Qualidade da Energia Elétrica (MQEEs) podem ser instalados em qualquer nó do sistema de distribuição e serão utilizados na composição do sistema de monitoramento de QEE. Como descrito em Bucci e Landi (2003), bem como em Chung, et al. (2006), a seleção da quantidade e a localização dos monitores são um problema crítico, pois está relacionada com a eficiência da capacidade de monitoramento. Sendo assim, na concepção da alocação, deve existir uma relação entre esta capacidade e a disponibilidade econômica, já que o número e localização apropriada dos monitores deve ser determinada otimamente (Olguin e Bollen, 2003).

No tocante aos distúrbios de QEE, as Variações de Tensão de Curta Duração (VTCDs) têm merecido maiores atenções. São os fenômenos com a maior dificuldade de monitoramento pelo fato de serem causados por fatores imprevisíveis, no qual a maior dificuldade não está associada à medição de sua magnitude ou duração, mas na determinação da sua frequência de ocorrência e fatores responsáveis por causá-los, com explicado em Cebrian, Almeida e Kagan (2010). Da prática, sabe-se que a duração desses fenômenos, mesmo sendo apenas de alguns milissegundos, podem acarretar em inúmeros problemas a equipamentos e dispositivos, em particular aqueles que fazem uso de dispositivos eletrônicos. As consequências nestes equipamentos vão desde a perda de dados, processamento errôneo, até mesmo a total paralisação do processo, e, conseqüentemente, perdas de produtividade com elevados prejuízos econômicos.

Ibrahim, Mohamed e Shareef (2011) citam que recentes estudos sobre qualidade da energia, continuam a apontar os afundamentos de tensão como o tipo mais frequente de distúrbio registrado em campo, em que os impactos resultantes

sobre cargas sensíveis são altamente severos. Criando-se então, pela visível e constante modernização de equipamentos presentes no cenário energético, a necessidade do desenvolvimento de melhores programas de monitoramento no âmbito da QEE, especialmente para VTCDs, uma vez que a maioria das cargas sensíveis está alocada em sistemas de distribuição.

Tradicionalmente, a instalação de um MQEE em sistemas de distribuição está diretamente relacionada às reclamações dos consumidores recebidas pela concessionária (distribuidora). Assim, cabe à empresa, a identificação e solução dos problemas que atingem seus consumidores, possuindo também como função, a identificação e punição do(s) causador(es) dos distúrbios elétricos, garantindo o nível de qualidade desejado para clientes afetados. No entanto, a instalação de MQEE baseado em reclamações pode não ser o suficiente para a observação de todos os distúrbios passíveis de ocorrência no sistema elétrico que podem afetar seus clientes. Won e Moon (2008) descrevem que no passado, os esquemas de alocações de MQEEs eram feitos manualmente por especialistas. Os profissionais instalavam os monitores de acordo com suas diretrizes, conhecimento de QEE e da topologia do sistema. Troncos principais de alimentadores, clientes específicos (quando solicitado) ou alimentadores expressos geralmente eram escolhidos como boas localizações. Contudo, os autores ressaltam que para uma abordagem automática, essas diretrizes e conhecimentos devem ser claramente formulados e padronizados, resultado assim numa precisão maior dos resultados.

No Brasil, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), responsável por regulamentar e fiscalizar os órgãos do setor elétrico brasileiro, tem demonstrado uma crescente preocupação em acompanhar continuamente os indicadores de QEE relacionados à interrupção do fornecimento de energia elétrica, exigindo que estes devam ser reportados mensalmente pelas concessionárias de energia atuantes, sujeitas a penalidades. No sentido de implementar essas medidas e buscar a normatização e padronização das atividades técnicas relacionadas à operação e desempenho dos sistemas de distribuição de energia elétrica, a ANEEL elaborou, e vem constantemente atualizando, uma série de documentos chamados de Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST). Em seu módulo 8, sobre a qualidade da energia elétrica, há indicativos

de que as campanhas de monitoramento serão intensificadas, requerendo uma melhoria na observação dos fenômenos relacionados à QEE (ANEEL, 2006).

Nos últimos anos, um grande número de estudos foram realizados com o objetivo de apresentar propostas de esquemas otimizados de alocações de MQEE em SDs. Pelas abordagens presentes na literatura consultada, na maioria dos casos, a alocação é tratada como um problema de otimização, onde seu principal objetivo está ligado à definição da quantidade mínima de monitores necessária para a obtenção de um monitoramento adequado das prioridades de observação estabelecidas.

Adicionalmente, um crescente cenário que vem ao encontro da alocação otimizada de monitores é o das redes elétricas inteligentes. Para uma adequada operação e coordenação entre os sistemas de geração convencional e distribuída, sistemas de transmissão (seja em corrente alternada ou contínua), e sistemas de distribuição, faz-se necessário a seleção e a aplicação de diferentes tecnologias para assegurar a utilização eficiente e o fornecimento confiável da energia para os usuários finais. Em um sentido amplo, uma adequada e desejada qualidade no fornecimento da energia será aquela que garantir a operação e a compatibilidade necessária entre todos os equipamentos conectados à rede. Portanto, como um consenso geral, pode-se afirmar que as novas tecnologias associadas às redes elétricas inteligentes oferecem a oportunidade de melhorar a QEE.

No entanto, monitorar todos os pontos de um sistema elétrico é um grande desafio, não só pelo alto investimento econômico, mas também pela necessidade de métodos que lidarão com a enorme quantidade de dados resultantes. Como encontrado em Chang et al. (2012), os avanços tecnológicos que impulsionam o desenvolvimento das redes inteligentes são: dos sistemas de comunicação integrados; dos sistemas de monitoramento; da concepção e disponibilização de novos componentes/equipamentos; dos métodos de controle, de melhores interfaces e de ferramentas de suporte para a tomada de decisão. Dito isso, a alocação otimizada de monitores pode evitar o gasto de capital em equipamentos excedentes e apontar a quantidade mínima de monitores necessários a fim de monitorar as grandezas referentes aos problemas de qualidade da energia elétrica.

Dada à importância ao problema delineado, é possível encontrar diversas metodologias na literatura correlata com o objetivo de alocar MQEE e avaliar a nocividade das VTCDs em SDs. Dentre elas, podem-se citar metodologias como a de

Won, et al. (2006) e Chung, et al. (2007) que se utilizam da teoria de grafos para expressar a conectividade dos elementos constituintes e a cobertura dos nós do sistema para o encontro de melhores esquemas de alocação. Também neste mesmo contexto, tem-se estratégias baseadas na formulação de uma matriz de cobertura de possíveis VTCDs dada pela simulação de curtos-circuitos no sistema estudado. Ou ainda métodos baseados no uso de programação linear para o encontro de soluções sobre o problema de alocação tentando assegurar máxima observabilidade dos nós do sistema em análise. O uso de algoritmos inteligentes de otimização também é feito para o encontro do melhor esquema de alocação, como nos trabalhos de Wei, et al. (2012), Ibrahim, et al. (2010) e Cebrian, Almeida e Kagan (2010).

Nesse contexto, o presente trabalho tem como principal objetivo o aprofundamento na observação das VTCDs em SDs. Visto que instalar monitores em todas as barras de um sistema de distribuição não é economicamente viável, torna-se necessário a criação e/ou o aprimoramento das técnicas e metodologias para a alocação destes equipamentos a fim de se obter as melhores localizações, acarretando na redução do custo total do monitoramento do sistema (Ibrahim, Mohamed e Shareef, 2011). Para isto, os impactos causados sobre as tensões dos nós nos SDs por esse distúrbio serão analisados para o encontro da menor quantidade e melhores localizações para a alocação de MQEES, com o intuito de, através de um monitoramento contínuo, inferir sobre observação, frequências, características e intensidade.

Levando em consideração que a aplicação de técnicas inteligentes para a resolução do problema de otimização está ligada à necessidade do conhecimento técnico de metodologias inteligentes por parte do operador, o presente trabalho busca apresentar também, uma técnica para a diminuição do espaço de busca das soluções, simplificando assim, o encontro de soluções subótimas para esquemas de alocação de MQEES em SDs que tenham a observação de possíveis VTCDs como objetivo principal.

A presente dissertação traz incorporada em sua metodologia, a alocação de MQEE direcionada ao monitoramento das VTCDs, procurando observá-las de uma maneira mais adequada, entendendo melhor suas causas, dando auxílio para o aumento da eficiência dos estudos que inferem sobre seus efeitos e na mitigação dos seus danos causados no sistema de distribuição.

1.1 Objetivos

Como descrito, a observação das VTCDs é um problema crítico para o sistema de monitoramento de uma empresa de fornecimento de energia. Tais fenômenos constituem um problema sério para os consumidores existentes nas redes de distribuição, visto que as consequências desses distúrbios geram grandes preocupações, especialmente nos processos industriais e instalações comerciais mais modernas, fato que pode ser constatado através da importância dada na literatura técnica especializada.

Neste contexto, desenvolver ferramentas para avaliar graus de exposição dos consumidores, estimar a frequência de ocorrência das VTCDs, localizar faltas nos sistemas (muitas vezes causadoras desses distúrbios), estudar suas causas e avaliar áreas através de um nível de exposição, passam a ser importantes atividades, tanto para a operação e planejamento de expansão e manutenção, como para a proteção dos SEPs e futuros investimentos.

Considerando que as metodologias apresentadas na literatura técnica apresentam vantagens e limitações, o presente trabalho tem como objetivo, apresentar adequações que podem ser facilmente incorporadas aos métodos já divulgados e que envolvem, principalmente, o uso de algoritmos inteligentes de otimização para resolver o problema da alocação de MQEEs. Também como contribuição, busca-se apresentar uma técnica para a diminuição do espaço de busca de soluções, imprimindo assim, uma melhoria da observação das VTCDs em SDs. Justifica-se a necessidade desta diminuição do espaço de busca, visto que, grande parte das metodologias observadas na literatura técnico-científica requerem alto esforço computacional, ou que como pré-requisito o conhecimento técnico avançado do operador sobre técnicas e métodos inteligentes de otimização/programação computacional aplicados em SEPs.

Portanto, os principais objetivos deste trabalho estão relacionados à apresentação de uma metodologia prática e direta para estimar o número de monitores, apontando uma adequada (não necessariamente ótima) localização dos mesmos sobre o sistema de distribuição de interesse e, também, à sugestão de modificações e adequações dos dados de entrada para o encontro de soluções subótimas de esquemas de alocação. Por fim, a metodologia proposta será

implementada via algoritmo genético para a otimização das possíveis soluções de alocações de MQEEs em SDs.

Cabe adiantar, que os ajustes propostos e a validação da metodologia serão realizados a partir de estudos realizados em sistemas de distribuição testes propostos pelo IEEE (*Institute of Electrical and Electronic Engineers*), bem como pela simulação computacional de um sistema teste real de uma concessionária regional de energia. Ao final, o Método de Monte Carlo (MMC) também será considerado a fim de comprovar a observabilidade do esquema de alocação frente às possíveis VTCDs que possam ocorrer nos SDs estudados.

1.2 Contribuições

Conforme explicado no item anterior, o estudo das metodologias existentes é parte essencial na confecção deste trabalho. Ter ciência do modo e técnicas utilizadas no desenvolvimento dos métodos que tratam do estudo das VTCDs para melhoria do sistema de monitoramento de QEE tem grande importância para a formulação de uma metodologia que busca melhorar a observabilidade desses distúrbios.

Visando tal objetivo, o presente trabalho pretende trazer como contribuição, a possível melhoria de alguns fatores presentes no processo de otimização de esquemas de alocação dos MQEE em SDs.

O primeiro a ser discutido neste trabalho, será a tratativa dos dados de entrada para o algoritmo inteligente de otimização, em específico, um algoritmo genético simples, cujo objetivo é encontrar a solução subótima de alocação dos monitores analisando uma matriz binária que representa suas localizações de instalação.

Em seguida, o trabalho trará uma maneira de análise simplificada da matriz citada para a redução do espaço de busca e possível encontro de uma solução adequada (ponto ótimo não garantido), com bons indícios de desempenho. A intenção dessa análise simplificada está atrelada à diminuição do esforço computacional envolvido, em função de uma possível simplificação das técnicas aplicáveis para alocar monitores. Permitindo assim, que as concessionárias de energia, órgãos reguladores e profissionais do sistema tenham mais facilidade e acessibilidade à obtenção das melhores localizações para a instalação desses equipamentos, sem a

necessidade do conhecimento avançado sobre técnicas de otimização e busca de soluções.

1.3 Estrutura do trabalho

A pesquisa desenvolvida e descrita neste documento está organizada em sete capítulos. Sendo o presente responsável por apresentar o contexto da alocação de MQEE em SDs, a importância de uma metodologia adequada para a alocação desses equipamentos e do monitoramento das VTCDs, e também, os objetivos do trabalho e suas possíveis contribuições.

O capítulo 2 fará o papel informativo de dissertar sobre os conceitos envolvidos na metodologia adotada no trabalho e a respeito das ferramentas utilizadas ao decorrer de sua execução. A descrição será breve e objetiva, de maneira que possa situar o leitor sobre os passos de execução tomados no capítulo 4.

O capítulo 3 traz uma revisão bibliográfica que situará o cenário técnico onde se encontra as diferentes técnicas desenvolvidas e encontradas na literatura atual para a alocação de MQEEs em SDs. As diversas abordagens utilizadas para o encontro de esquemas otimizados de alocação para os monitores serão percorridas, apresentando suas relevâncias para o assunto estudado e seus objetivos adotados.

O capítulo 4 descreve a metodologia adotada para a abordagem do problema de alocação de MQEE responsável pelo monitoramento das VTCDs. Os conceitos empregados, utilização das ferramentas descritas no capítulo 3, e os passos de execução adotados em cada etapa serão explicados, assim como as considerações adotadas em certos pontos chave da metodologia para o encontro das melhores localizações de instalação dos monitores.

O capítulo 5 é responsável por apresentar quais serão os sistemas elétricos utilizados para a validação da metodologia proposta, apresentando suas características, equipamentos, particularidades e método de modelagem. Neste tópico, serão apresentados os três sistemas teste de distribuição de energia radiais do IEEE, sendo estes de 13, 34 e 123 nós, bem como um sistema de distribuição teste real de uma concessionária regional de energia.

O capítulo 6 apresenta os resultados do desenvolvimento da pesquisa. As repostas obtidas através do método de busca via algoritmo inteligente de otimização serão descritas, bem como a análise pelo método simplificado. Sendo possível, deste modo, efetuar uma comparação entre estes dois procedimentos a fim de testar suas eficácias. Publicações resultantes do trabalho também serão expostas a caráter informativo, associando mérito à proposta.

O capítulo 7 é dedicado às conclusões evidenciadas ao fim da análise do método utilizado, as vantagens e limitações associadas. Nele serão descritas a decorrência dos passos do trabalho, considerações finais e fechamento da metodologia. Este capítulo também irá discorrer acerca dos possíveis futuros trabalhos que possam dar continuidade à metodologia apresentada. A sucessão viável dessa linha será dada depois de apresentadas as suas limitações, desvantagens e particularidades que estão ausentes na análise proposta, dando assim, a possibilidade do aumento da robustez e eficácia da metodologia até então apresentada.

2 Referencial Teórico

Para a melhor compreensão do leitor sobre o presente cenário que o método foi criado, esta seção será dedicada a uma breve apresentação dos conceitos teóricos e ferramentas utilizadas na metodologia elaborada.

2.1 Variações de Tensão de Curta Duração

A ANEEL em seu documento Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) - Módulo 8, referente à Qualidade da Energia Elétrica, estabelece critérios para a qualidade do produto e serviços prestados pelas distribuidoras de energia e acessantes ao sistema elétrico. Este módulo define a terminologia, caracteriza fenômenos, parâmetros e valores de referência relativos à conformidade de tensão em regime permanente e às perturbações na forma de onda de tensão, estabelecendo mecanismos que possibilitem à ANEEL fixar padrões para os indicadores de QEE. Sobre a qualidade dos serviços prestados, o módulo estabelece a metodologia para apuração dos indicadores de continuidade e dos tempos de atendimento às ocorrências emergenciais, definindo padrões e responsabilidades.

No documento citado, as VTCDs são definidas como desvios significativos no valor eficaz da tensão em curtos intervalos de tempo. Sua classificação pode assumir dois tipos: “Variação Momentânea de Tensão”, tendo sua duração superior ou igual a um ciclo, e inferior ou igual a três segundos; e “Variação Temporária de Tensão”, na qual a duração da variação é superior a três segundos e inferior a três minutos. A denominação do evento pode ser dividida em três categorias associadas à amplitude da tensão (valor eficaz) em relação à tensão de referência, sendo as mesmas: “Interrupção de Tensão”, quando a amplitude assume um valor inferior a 0,1 p.u.; “Afundamento de Tensão”, referente a um valor superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 p.u.; e finalmente, “Elevação de Tensão”, para valores superiores a 1,1 p.u..

Sobre as causas principais das VTCDs, duas situações se destacam como as principais: manobras de grandes cargas na rede, principalmente de grandes motores, e ocorrências de faltas (curtos-circuitos) (Cebrian, 2008).

Conforme registrado na literatura técnica (WEG, 2015), durante a partida de grandes motores de indução, a corrente de partida pode alcançar valores bastante elevados quando não devidamente compensados, expondo a rede da distribuidora a uma situação passível de ocorrência deste distúrbio. A magnitude do afundamento depende da intensidade da corrente de partida do motor e das características da rede como um todo. Uma rede robusta é aquela de baixa impedância equivalente no ponto de acoplamento comum e baixa impedância dos cabos da instalação que supre o motor. A queda de tensão será função do produto de toda a impedância entre a carga e o barramento analisado, pela corrente de partida. No entanto, na maioria dos casos, durante o planejamento da instalação é considerado um valor máximo para a queda de tensão nesses eventos (tipicamente entre 10 a 12% da tensão nominal do secundário do transformador). Para tal compatibilidade, vários métodos foram criados na tentativa de amenizar tal efeito, como: o aumento da seção nominal dos condutores; a utilização de um ramal exclusivo para a carga; instalação de métodos de partida suave (como chaves eletrônicas de partida); a solicitação pela concessionária de um reforço da rede de alimentação; e a utilização de reguladores de tensão. Desse modo, as VTCDs causadas por acionamento de grandes blocos de carga são, na maioria dos casos, facilmente controladas e limitadas a valores que não causem problemas a instalação como um todo.

Consequentemente, a maioria das VTCDs que ocorrem no sistema elétrico está diretamente relacionada a curtos-circuitos. Como explicado em Cebrian (2008), estes são fenômenos de natureza estocástica, tornando-se inevitáveis em sistemas elétricos de grande porte. A circulação da corrente de falta através das impedâncias do sistema causa quedas (afundamentos) de tensão ao longo da rede. A extensão das VTCDs depende da topologia da rede e de suas impedâncias, tanto no ponto de falta quanto ao longo dos ramais. Dentre todas as causas de curtos-circuitos, as maiores responsáveis são as descargas atmosféricas. Seus efeitos são sentidos principalmente na rede de distribuição de energia por ter seu nível de isolamento bem inferior aos de linhas de transmissão.

Apesar destes distúrbios mencionados geralmente serem de curta duração, todos podem ser responsáveis por graves problemas para o consumidor,

principalmente na área industrial onde estão concentrados os equipamentos mais sensíveis a estas variações de tensão de curta duração, tais como acionamento de motores, equipamentos de processamento de dados e de controle (Farqui, 2005).

A magnitude das VTCDs está associada à configuração da rede em estudo e depende da determinação do local da incidência da falta. Dentre os principais fatores de influências destes distúrbios, pode-se citar:

- Tipo de falta: Em ordem decrescente, as faltas que causam os afundamentos mais severos são: Trifásicas, Trifásicas-Terra, Bifásicas, Bifásicas-Terra e Monofásicas (Santos e Silva, 2003).
- Localização da Falta: A localização da falta determina o número de consumidores que serão afetados pela VTCD. Faltas em sistemas de distribuição são responsáveis por afundamentos mais severos aos consumidores ligados ao ramal atingido e ramais adjacentes.
- Impedância de falta: Constituída pela resistência de arco ou resistência de contato entre os condutores ou mesmo da resistência de terra. A severidade da falta será inversamente proporcional ao valor de sua impedância, pois a propagação do afundamento no SD será proporcional ao valor da corrente de falta.

Por ser a maior causa das VTCDs em SDs, o estudo sobre a robustez do sistema que dará resposta para o melhor esquema de alocação dos MQEE será feito através de simulações de curtos-circuitos no sistema analisado. Por meio dessa análise, é possível gerar um quadro das possíveis VTCDs que o sistema pode estar suscetível e analisar como estes distúrbios se propagam sobre os SDs de interesse. Assume-se então, como verdade, que os melhores pontos para a escolha de instalação dos monitores, geralmente, são os nós mais vulneráveis do sistema, uma vez que um monitor instalado nessa localização será sensibilizado por diversos eventos, aumentando a observabilidade do sistema como um todo.

2.2 Ferramentas Utilizadas

Os itens que seguem serão responsáveis por descrever as principais ferramentas utilizadas no decorrer do processo de otimização adotado. Instrumentos responsáveis pela modelagem dos SEPs estudados, extração de dados, leitura e interpretação das saídas (respostas), linguagem de programação utilizada para a

formulação do algoritmo genético e na análise dos resultados que serão expostas de uma maneira simples e objetiva.

2.2.1 Algoritmos Genéticos

Algoritmos Genéticos (AGs) são técnicas de busca e otimização baseadas nos princípios da genética e seleção natural. Um AG permite que uma população composta por vários indivíduos evolua sobre regras específicas de seleção para um estado que maximize seu “valor de adaptação” (ou seja, minimize o custo da função) (Haupt, R. e Haupt S., 2004).

Estudadas e desenvolvidas por Charles Darwin, quatro premissas fundamentam a teoria da seleção natural e evolução:

- Uma prole tem muitas características dos seus pais. Essa premissa implica na estabilidade da população;
- Existe diversidade nas características entre os indivíduos que podem ser passadas por gerações;
- Apenas uma pequena porcentagem da prole produzida sobreviverá até a fase adulta; e
- A sobrevivência da prole depende das características herdadas.

Um grupo de indivíduos passíveis de cruzamento é chamado de população. Sobre certas condições, as características da população são definidas pela *Lei de Winberg*. Este princípio expressa que a frequência de ocorrências de alelos permanecerá a mesma dentro de uma população se não houver nenhuma perturbação. Assim, mesmo que os indivíduos apresentem grande variedade, a estatística da população permanece a mesma. No entanto, sabe-se que poucas populações permanecem estáticas por muito tempo. Quando a população deixa de ter este atributo, a proporção de frequências de alelos não é mais constante entre gerações e a evolução ocorre. Este processo dinâmico exige uma pressão externa. Tais eventos podem ser divididos em quatro tipos específicos (Haupt, R. e Haupt S., 2004):

- Mutações – Mudanças aleatórias podem ocorrer na característica de um gene com a possibilidade de transmissão entre proles. Mutações podem ser espontâneas ou causadas por fatores externos como a exposição a fatores ambientais;

- Fluxo de gene – Pode ser resultado de uma introdução de novos organismos dentro da população passível de cruzamento;
- Mudança genética – Fenômeno de natureza estocástica que pode ocorrer em pequenas populações resultando, certas vezes, na eliminação de certos alelos pelas combinações aleatórias no cruzamento; e
- Seleção natural – Responsável pela escolha dos indivíduos mais adaptáveis para a reprodução da próxima prole. Nesse processo, certos alelos podem produzir um indivíduo que seja mais preparado para lidar com seu meio.

Através destes fenômenos, genes se combinam e realizam cruzamento para produzir novos indivíduos com combinações de particularidades específicas, regendo assim, as dinâmicas de interações de uma grande população através de suas características. Desse modo, após um longo período de tempo, a amostra de indivíduos se torna mais adaptáveis ao seu meio ambiente.

O método referente aos AGs foi desenvolvido por John Holland (1975) no decorrer das décadas de 60 e 70, e, finalmente, popularizada por um de seus estudantes, David Goldberg, que resolveu um problema complicado envolvendo controle de uma tubulação de transmissão de gás (Goldberg, 1983). Através de suas contribuições, Goldberg foi, provavelmente, o principal responsável pela divulgação e o crescimento das aplicações dos AGs. Desde então, várias versões de programações evolutivas têm aparecido com diversos níveis de sucesso.

Dentre as principais vantagens relacionadas aos AGs, estão:

- Otimizam o problema com variáveis contínuas e discretas;
- Não requerem informações de derivadas;
- Executam a busca simultânea de uma grande amostragem na superfície de custo;
- Lidam com um vasto número de variáveis;
- Se adequam bem à computação paralela;
- Otimizam variáveis com superfícies de custos muito complexas (podem sair de um mínimo local);
- Fornecem uma lista de variáveis ótimas, não somente uma única solução; e

- Funcionam com dados gerados numericamente, dados experimentais ou funções analíticas.

No processo de construção da metodologia utilizada neste trabalho, o algoritmo genético utilizado foi modelado em sua forma mais simples, através de uma busca binária. O AG começa como qualquer outro algoritmo de otimização, definindo as variáveis a serem otimizadas e função de avaliação. Sendo finalizado também, similarmente, por um teste de convergência. Os parâmetros e a escolha de métodos de criação da população, cruzamento, avaliação, mutação e seleção serão descritas no capítulo referente à metodologia da pesquisa.

2.2.2 Simulação de Monte Carlo

Problemas de natureza estocástica são geralmente solucionáveis por métodos estatísticos, em que o domínio dos dados de entrada é conhecido (ou sua distribuição), e cenários são aleatoriamente criados e estudados por inferências estatísticas. No tocante a resolução de problemas estatísticos ou problemas não determinísticos que não podem ser resolvidos através de métodos matemáticos usuais, uma solução bem conhecida e difundida na literatura técnica-científica é o Método de Monte Carlo (MMC).

O MMC foi modelado por cientistas (Stanislaw Ulam, John von Neumann, Enrico Fermi, entre outros) que trabalhavam no projeto da bomba atômica na década de 40. Esta época foi responsável por grandes mudanças em importantes áreas de pesquisas como simulações computacionais numéricas e métodos probabilísticos, fazendo que estes sofressem uma revolução, proporcionada principalmente pelo desenvolvimento do primeiro computador eletrônico, o qual possibilitava a resolução de cálculos matemáticos em uma velocidade de processamento maior. Tragicamente, tal crescimento e revolução tecnológica se deram principalmente por ser uma década marcada pela Segunda Guerra Mundial, apesar dos estudos terem sido continuados após o fim do conflito (Metropolis, 1987).

Em termos gerais, o MMC pode ser utilizado para descrever qualquer técnica que aproxima soluções de problemas quantitativos através de uma amostragem estatística. É um tipo de simulação que representa de maneira explícita e quantitativa as incertezas de um problema. Caso as entradas de um sistema sejam incertas, a previsão de seu desempenho futuro também é, necessariamente, incerta. Sendo

assim, o método se baseia no processo de representar essas incertezas das entradas através de distribuições de probabilidade. Isto é, o resultado de qualquer análise baseada em entradas representadas por distribuições de probabilidade é também uma distribuição (Eckhardt, 1987).

O MMC é uma opção versátil para analisar o comportamento de uma atividade, plano ou processo que envolve incertezas. Pode ser utilizado para estudos das demandas de mercados incertas ou variáveis, custos flutuantes, variações em processos de produção, investimentos em bolsas de valores, desenvolvimento de novas drogas, ou até para perfurar um poço de petróleo. O método beneficia o usuário através do entendimento do impacto da incerteza e desenvolvimento de planos para mitigar e lidar com os riscos (Solvers, 2015).

Pelo MMC, todo o sistema é simulado um grande número de vezes, como por exemplo, 1.000 vezes. Para cada realização, todos os parâmetros incertos são amostrados. Isto é, um único valor aleatório é selecionado de uma específica distribuição descrevendo cada parâmetro. As respostas perfazem um grande número de resultados separados e independentes, cada um deles representando um possível “futuro” para o sistema. Os resultados independentes do sistema são então agregados em distribuições de probabilidade de possíveis respostas. Como resultado, as saídas não são valores próprios, mas distribuições de probabilidade (Eckhardt, 1987).

Na presente pesquisa, o MMC será utilizado na parte final de validação da metodologia a ser apresentada. Como as VTCDs são fenômenos aleatórios com o domínio de entrada conhecido, e sua principal causa em SDs está relacionada com as possíveis faltas que o sistema pode enfrentar, a observabilidade do esquema de alocação de monitores sugerido será colocada à prova através da simulação de diversos cenários de curtos-circuitos ao longo de seus ramais. Ao final da simulação, o método entregará como saída, a quantidade de faltas simuladas nas quais nenhum monitor instalado foi sensibilizado.

A intenção desse experimento é de analisar a eficiência do sistema de monitoramento frente aos diversos cenários de faltas que possam causar VTCDs no SD em análise, bem como, o quanto de sua eficácia é perdida quando diferentes parâmetros de restrição são adotados na entrada do processo de otimização, ou quando há a ausência da instalação de algum monitor dado como resposta pelo método. Vale ressaltar que, até o momento, o autor não encontrou nenhum uso do MMC para a validação de um esquema de alocação de monitores como sugerido por

este trabalho, considerando assim este procedimento, também como uma das suas contribuições.

Cabe comentar que toda a implementação da metodologia a ser apresentada foi desenvolvida dispondo-se do MATLAB e de certos toolboxes associados (Mathworks, 1994-2016). Maiores detalhes das implementações serão fornecidos a depender da necessidade do conteúdo que segue.

3 Levantamento Bibliográfico

Com a crescente importância do monitoramento das VTCDs, linhas de pesquisa e trabalhos publicados na área tiveram sua quantidade aumentada consideravelmente. O presente capítulo tem a intenção de apresentar um levantamento bibliográfico sintetizado das metodologias que foram relevantes na condução desta pesquisa para a alocação de MQEEs em SDs, descrevendo brevemente cada método e as ferramentas consideradas.

A apresentação será dividida em duas principais abordagens para a solução do problema de alocação de monitores: a minimização da ambiguidade dos sistemas de monitoramento e a observação das VTCDs. Vale ressaltar que a presente revisão, está voltada a apresentação das diferentes formas existentes e utilizadas no processo de otimização, dando mais foco ao método utilizado para a otimização do que à quantidade de trabalhos realizados.

3.1 *Minimização da Ambiguidade de Monitoramento dos Sistemas Elétricos*

Uma interessante abordagem para o problema de alocação ótima de MQEE em sistemas de distribuição é apresentada por Won e Moon (2008). Os autores apresentam um algoritmo de otimização implementado por programação linear, em que a topologia do sistema é transformada em uma matriz de cobertura que indica a relação de “parentesco” entre os elementos do sistema estudado. Posteriormente, são atribuídos pesos para os componentes, os quais têm como função representar seu nível de importância para o sistema. Fatores pesos são atribuídos aos componentes de acordo com regras baseadas nas leis de *Kirchhoff* e por arbitrariedade do operador, de acordo com o objetivo de otimização (mais cargas ou mais ramos monitorados, por exemplo), dando maiores pesos para ramos com mais descendentes, e privilegiando a instalação de monitores no começo do ramo para maior observação. A resposta da quantidade otimizada e a localização dos monitores são determinadas por um algoritmo iterativo que busca sua solução alocando monitores nos elementos de maior

fator peso, checando índices de ambiguidade para que este seja minimizado. O SEP em análise é representado por um grafo convertido em uma matriz de índices para se obter a matriz da rede e representar as interconexões geométricas de seus elementos. Através da matriz de cobertura e de pesos aplicados, uma função objetiva é modelada e a otimização da localização é dada por números fixos de monitores. Tentativas aleatórias são realizadas até o encontro da solução com menor índice de ambiguidade. A presente metodologia, além de depender de arbitrariedades definidas pelo operador, somente aloca monitores através da ambiguidade para as diretrizes de alocação, resultando em uma alocação genérica com um leque de quantidade de monitores como resposta, sem o interesse de expressar uma quantidade mínima de monitores para observar algum evento em específico.

Reis (2012) trata o problema de alocação de monitores como um problema de recobrimento, o que é um quadro amplamente discutido em estudos de otimização combinatória como em Nemhauser e Wolsey (1988) e Hochbaun (1995). Inicialmente, a metodologia do trabalho desenvolve uma matriz de conectividade representando as conexões entre barras, mostrando a capacidade que estas teriam, caso houvesse um monitor instalado, em monitorar grandezas elétricas (tensão e correntes) das barras vizinhas, uma vez que os parâmetros das linhas que ligam as barras são conhecidos. O produto desse processo é uma matriz binária que é utilizada para apontar a alocação dos monitores para observar todas as correntes e tensões do sistema. Desse modo, a topologia do sistema é um ponto crítico a ser analisada, e seu resultado de alocação fica limitado ao fato que esta deve permanecer constante. O método proposto também associa custos de instalações para as barras do sistema elétrico, minimizando assim também, o custo global de instalação dos monitores. Como a diferença da metodologia para sistemas de distribuição e transmissão, neste caso, é basicamente o nível de tensão analisado, a autora relata que o método proposto pode ser aplicado em ambos cenários. A principal contribuição do trabalho está associada à ferramenta utilizada para o encontro da solução subótima, onde um novo algoritmo de programação dinâmica aproximada, baseado na heurística de fixação de variáveis, foi utilizado. Este também foi comparado com um algoritmo de solução ótima, *branch and bound*, e obteve resultados satisfatórios.

Xie et al. (2014) utilizam das mesmas propostas da referência anterior para fazer a alocação automatizada de monitores, em que pesos são dados aos

componentes e sua ambiguidade calculada. Sua principal contribuição está na junção de outras técnicas para o problema, como a matriz de faltas (a ser apresentada e utilizada em capítulos posteriores neste documento), a implementação dos custos de instalação e a metodologia para a localização automatizada dos distúrbios. O artigo tem foco na construção de um sistema de monitoramento no qual seria possível observar as grandezas de todos os ramos do sistema, o que torna economicamente inviável a execução do projeto. Os autores apontam as melhores configurações iniciais para o processo de instalação dos monitores, criando uma metodologia para a localização dos distúrbios de qualidade da energia baseada na matriz de cobertura e sensibilização dos monitores quando todas as barras do sistema são monitoradas.

3.2 Observação das VTCDs

Pereira, Da Silva e Mantovani (2004) apresentam um programa de localização de falta baseados na observação das VTCDs que é dependente de uma boa alocação de monitores em sistemas de distribuição. A abordagem é apresentada como um problema de otimização, em que a alocação dos equipamentos nos nós do sistema elétrico de distribuição deve ser feita a fim que todas as faltas que causem VTCDs sejam observadas por pelo menos um monitor. Em sua metodologia, os autores utilizam o método de posição de faltas para simular distúrbios e tratam a situação como um problema combinatório, a ferramenta utilizada para a otimização do problema tem o nome de Busca Tabu (*Tabu Search* - TS). Como entradas para o algoritmo, uma rotina de cálculo é feita para estimar as matrizes de impedância do sistema, e para cargas desbalanceadas, o cálculo do fluxo de potência é tratado considerando as três fases. Várias simulações de faltas (curtos-circuitos) são executadas para obter as tensões residuais nas barras do sistema. Com o objetivo de encontrar a melhor solução de alocação, o algoritmo cria uma lista de vizinhança e atributos proibidos. A lista de vizinhança é criada por meio de configurações de alocação derivadas de uma configuração inicial criada de acordo com a topologia do sistema. Cada uma destas configurações é avaliada como solução e verificada se não há atributos proibidos (restrições). Depois de avaliada toda a vizinhança em relação à função objetivo (maior observabilidade), a melhor configuração desta é modificada para a criação de uma nova vizinhança, repetindo assim todo o processo. O algoritmo converge quando o número máximo de iterações for alcançado. O processo incorpora

assim, uma espécie de memória adaptativa, sensível à exploração realizada. Um consistente e básico algoritmo de TS carrega um conjunto de transições usando memória de curto prazo para armazenar a lista de atributos proibidos, os critérios especificados de aspiração, e executa um mecanismo para a transição depois de analisado todos os candidatos vizinhos, ou uma porção desses candidatos. A lista de vizinhança é construída para todos os monitores, um a um, mudando para todas as posições da configuração atual onde não há alocação. No fim dessas transições é obtido o conjunto de solução da vizinhança. A lista Tabu armazena os atributos das melhores configurações (ou menos piores) já visitadas, para evitar o retorno a essas configurações.

Almeida e Kagan (2009) fazem uso de uma interessante alternativa aplicando algoritmos genéticos para formular uma solução para a alocação de MQEE para a observação de afundamentos e elevações de tensão, já que o problema consiste em encontrar a solução ótima entre várias soluções. No trabalho, para garantir que a área de observação dos MQEEs em sistemas de distribuição fosse a maior possível, várias simulações (1.770 para um sistema de 30 barras) foram realizadas para evidenciar as posições dos monitores em função dos tipos e pontos de localização das situações de curtos-circuitos consideradas. Das simulações, matrizes de observabilidade do sistema estudado são criadas, caracterizando basicamente o desempenho de um SEP frente às possíveis ocorrências de variação de tensão. Os dados destas matrizes são utilizados como entrada para o AG em que uma população inicial é criada e seus indivíduos são avaliados individualmente, passando, posteriormente, por um processo de seleção, mutação e cruzamento. A avaliação de cada indivíduo é dada por uma função de *fitness* de acordo com a função objetivo do problema de alocação, a qual está relacionada com a maximização da observabilidade do sistema analisado e a minimização da quantidade de monitores necessários, indicando o quanto cada indivíduo satisfaz os objetivos do problema. Para o cálculo da função de fitness, os autores fazem uso da teoria *Fuzzy*, onde, juntamente com o AG, se tornou um conveniente método para apontar as possíveis configurações das alocações dos MQEEs, fazendo com que, nesta abordagem, a convergência do AG não seja afetada pelos valores da função objetivo e funções de penalização relacionadas às restrições da otimização. Assim, os autores determinam como o vetor de redundância das

medidas está relacionado com a possível solução a ser avaliada, considerando todo o espaço de observação para o problema evidenciado.

Em Cebrian, Almeida e Kagan (2010), a metodologia proposta executa um método estocástico para definir as simulações de curtos-circuitos que vão ser consideradas para caracterizar o comportamento da rede estudada, considerando afundamentos e elevações de tensão em um sistema de distribuição. Este método tenta abranger todas as possíveis combinações das variáveis presentes na ocorrência de um curto-circuito. Para esta execução, os valores de algumas variáveis são definidos de acordo com a distribuição probabilística que refletem o real comportamento do sistema de potência, enquanto os valores para outras variáveis são aleatoriamente definidos, como de impedância de falta. Para o uso deste método estocástico é utilizado a abordagem do Método Híbrido (MH). Sua vantagem para a alocação de monitores de qualidade de energia consiste na consideração dos curtos-circuitos com maior probabilidade de acontecer. O conceito do MH está em definir um número de faltas para o sistema e distribuí-los de acordo com as suas probabilidades de ocorrências envolvidas. O MH é composto por dois principais métodos, o MMC e de enumeração de estado, pelos quais todas as possíveis combinações de variáveis aleatórias com suas correspondentes probabilidades são previamente definidas. Os resultados das simulações realizadas com diferentes cenários e impedâncias de falta são transcritos em uma matriz chamada de matriz de observação. No uso de algoritmos genéticos para a solução, os cromossomos dos indivíduos são apresentados como um vetor de valores que indica se há ou não monitores instalados nas barras do sistema, e o número de genes (que correspondem ao número de monitores) são dados no começo do processo evolutivo. Quando aplicado o AG para este problema de otimização, o quão menor for o valor da função de *fitness* dada pelo cromossomo, melhor será a alocação associada ao indivíduo. Isso implica que o cromossomo em questão tem maior chance de sobreviver em futuras gerações. Posteriormente a este processo, o algoritmo faz a recombinação dos genes por meio dos indivíduos da elite global, combinando estes para formar descendentes com melhores características. Por fim, um processo de mutação deve ser aplicado à população para que seja evitado que o algoritmo apresente um ponto de mínimo local como solução, garantindo que o algoritmo não convirja prematuramente. É importante ressaltar, associando crédito à metodologia apresentada pelos autores, que o MMC

aplicado neste trabalho inspirou sua aplicação como meio de validação dos esquemas de alocação de monitores propostos na presente pesquisa.

Ibrahim, et al. (2010) apresentam sua primeira publicação referente a alocação de medidores em SDs com o objetivo de monitorar VTCDs. A abordagem é ligeiramente simples, e o equipamento alocado é chamado de “Gravador de Afundamentos de Tensão”. Sua alocação é feita através de uma matriz de afundamentos que é consruída através da aplicação de faltas no sistema a ser estudado. Posteriormente, essa matriz é transformada em uma matriz de cobertura binária que é utilizada como entrada do algoritmo genético para o encontro da melhor solução referente a menor quantidade de medidores para monitorar VTCDs no sistema como um todo. No processo, uma variável também é criada, chamada de “Índice de Severidade de Afundamento”, cuja função é mostrar o nó do sistema que tem maior influência para afundamentos quando comparado a outros nós numa situação de falta. A metodologia foi aplicada e os resultados foram analisados através do sistema teste de 34 nós do IEEE. Apesar desta referência ter ajudado na compreensão do uso de AGs nesse processo, influenciando parte desta pesquisa que está sendo apresentada, diferentes rumos serão tomados na aplicação da presente metodologia, como a aplicação de valores diferentes de zero para a impedância de falta e na método de construção das matrizes de cobertura.

Ibrahim, Mohamed e Shareef (2011) trazem uma nova proposta para o problema de alocação de monitores em sistemas de distribuição para o monitoramento de VTCDs utilizando matrizes de conectividade construídas a partir das informações topológicas do sistema. A contribuição da metodologia está ligada ao fato de que no processo de criação dessas matrizes, a área de cobertura considera limites de tensões para achar a posição ótima dos monitores, e o uso da matriz dessa área, é considerado como um simples e apropriado método para determinar a melhor solução. No entanto, segundo os autores, essa matriz não deve ser utilizada para a busca da alocação sub ótima em sistemas de distribuição radiais em sua forma original. O uso desse método é apropriado, mas requer uma modificação para ser implementado. A nova matriz apresentada, MTC (Matriz Topológica de Cobertura), considera a topologia do sistema radial para que monitores não sejam alocados em pontos indevidos, dando assim, maior suporte à localização da falta a ser considerada. Como resultado, todas as barras subsequentes da localização da falta serão inviáveis

para a instalação do MQEE. Segundo a proposição dos autores, há dois passos envolvidos em encontrar a solução subótima para a alocação de monitores. O primeiro é determinar o número mínimo de MQEE, e o segundo, é encontrar as melhores localizações. Para obter as posições de instalação, um vetor de existência é calculado, o qual indica onde o monitor deve ser instalado, e para o número sub ótimo de monitores, uma abordagem via algoritmo genético é considerada. A busca do algoritmo deve apresentar o número mínimo de monitores mantendo a observação das variações de tensões em todo o sistema. No processo do AG, a população inicial do vetor é aleatoriamente criada e então os operadores genéticos alteram os indivíduos a cada geração, até que o critério de convergência seja atingido. Como na referência passada, créditos devem ser associados aos autores desta referência. Desta vez, por inspirarem a sugestão na modificação da matriz de cobertura topológica para o aumento da sensibilidade à localização da falta simulada, adotado por este trabalho. Esta modificação é vista como uma contribuição que pode melhorar os esquemas de alocação de MQEE visando não somente o monitoramento das VTCDs, mas também, o maior suporte a um possível estudo de localização de falta futuro.

Ibrahim, et al. (2011) apresentam uma nova forma de abordar o problema de otimização de alocação de MQEE. Diferente de outras técnicas, esta é sugerida por ter uma taxa de convergência maior, sendo baseada em Otimização por Exame de Partículas (OEP). O objetivo desse estudo é desenvolver um algoritmo baseado em OEP para resolver a alocação otimizada de MQEE tanto em sistemas de distribuição quanto de transmissão. Nesse algoritmo, a matriz topológica de cobertura (MTC) e o parâmetro de cobertura do monitor são usados para obter a solução subótima. Para resolver o problema de otimização, o algoritmo Enxame de Partículas de Otimização Binária foi desenvolvido usando o software MATLAB. Neste processo, uma população inicial de partículas é aleatoriamente criada em valores binários para representar suas posições no vetor de alocação. Então, os operadores do método atualizam as velocidades das partículas baseados na velocidade atual dado pela manipulação dos *bits* das partículas. Em cada geração, a melhor posição de partícula explorada, e a melhor posição global explorada pelo enxame, são atualizadas baseadas numa função objetivo. O processo é executado por um número fixo de vezes ou até o critério de convergência ser atingido.

Kempner (2012) reapresenta o método das posições de falta como um meio analítico para se determinar as tensões remanescentes em todas as barras constituintes de um sistema de distribuição quando da ocorrência de uma falta, a fim caracterizar os cenários que constituem um afundamento de tensão. O método é responsável por criar a matriz de conectividade que indica as áreas afetadas e áreas de vulnerabilidade de um sistema de distribuição em relação aos distúrbios simulados. No trabalho, a matriz é utilizada como entrada do algoritmo *Branch & Bound* que determinará o número ótimo de MQEES para a observação dos fenômenos de acordo com suas regras de montagem, bem como as barras onde os mesmos devem ser instalados para monitorar os afundamentos de tensão, com o objetivo de garantir que ao menos um dos monitores seja sensibilizado para cada um dos curtos-circuitos simulados. Apesar de a matriz ser construída através da simulação de faltas trifásicas francas, a autora esclarece que o método pode ser descrito como funcional para observar as VTCDs como um todo, porque, geralmente, as elevações de tensão tem sua causa relacionada a um afundamento ocorrido em outra fase do sistema. Na pesquisa, também é feita uma comparação do método de posições de falta com as simulações realizadas via o *software ATP*, onde é concluído que a ferramenta utilizada mantém a precisão dos resultados em limites aceitáveis, mesmo considerando certa simplificação nos procedimentos de cálculo e na modelagem computacional dos componentes do sistema. Apesar de o presente trabalho ser similar ao apresentado por Kempner, em relação ao método de confecção da matriz de entrada do algoritmo de otimização, diferentes considerações sobre sua construção serão feitas, como: tipo de falta a ser analisada, impedância de falta, método de construção e ajustes topológicos. O presente trabalho considera tais modificações como contribuições individuais para a metodologia de alocação otimizada de MQEE para a observação das VTCDs.

4 Metodologia

A alocação de MQEEs em SDs pode ser realizada através de diversos métodos. A sua execução pode variar de acordo com os objetivos e critérios adotados no processo de otimização. Um objetivo recorrente em diversas metodologias está relacionado à redução do custo do sistema de monitoramento através da minimização da quantidade de monitores instalados, dado que a instalação de MQEEs em todos os nós do sistema é técnica e economicamente inviável. Tal propósito dependerá, então, dos critérios adotados para a otimização, como: a minimização da ambiguidade do sistema de monitoramento do SD; observação de algum fenômeno em específico; e monitoramento de clientes importantes/notáveis, etc.

Ainda assim, mesmo que metodologias adotem os mesmos objetivos, a resposta de esquemas ótimos de alocação pode variar. A razão disto está ligada ao fato que os processos considerados para a execução do método podem adotar diferentes parâmetros ou ferramentas de otimização, como o tratamento dos parâmetros de entrada para o algoritmo de otimização, ou o estudo topológico do sistema em avaliação. Adicionalmente, métodos com aplicação de heurísticas e meta-heurísticas, por exemplo, não garantem o encontro do ponto ótimo de um processo de otimização, ocorrendo a possibilidade de respostas distintas, que, no entanto, não necessariamente indica que o uso destes não seja adequado para este propósito.

Uma característica notável dos dois métodos que serão apresentados, Método via AG (item 4.5) e Método Simplificado (item 4.6), é a capacidade de indicar bons candidatos para investimentos iniciais do sistema de monitoramento, uma vez que esquemas otimizados de alocação de MQEEs, dados através de outras metodologias, podem se referir a uma quantidade de monitores que excede o valor de investimento mínimo possível para a concessionária interessada.

A fim de caracterizar a pesquisa como um todo, a Figura 4.1 apresenta os passos adotados para a execução das duas metodologias adotadas.

Cabe enfatizar que os principais blocos apresentados na Figura 4.1, serão descritos nos itens de 4.1 a 4.7, mas que, somente os blocos 4.5 e 4.7 serão independentes, e/ou poderão ser executados de forma paralela na obtenção da alocação dos MQEEs. Todo o restante dos blocos é comum aos dois métodos (via AG ou simplificado).

4.1 Aquisição dos dados do sistema elétrico

O primeiro e fundamental passo, está relacionado à aquisição dos dados do sistema elétrico em que o método será aplicado. Estes devem representar o SEP desejado de maneira adequada em sua totalidade, primando por características importantes como: suas configurações topológicas, impedância de suas linhas, características dos transformadores de potência, suas cargas (fixas ou distribuídas), dados dos bancos de capacitores, reguladores de tensão e qualquer outra particularidade do sistema.

As impedâncias das linhas de distribuição em especial, merecem uma maior atenção. As mesmas carregam a maior responsabilidade sobre os afundamentos de tensão, visto que a queda de tensão causada nas linhas é proporcional aos valores das suas impedâncias e à corrente que por elas passam. Por outro lado, as cargas detêm certa importância na simulação dos SEPs, pois são responsáveis pelas tensões pré-falta nos nós do SD.

Figura 4.1 – Metodologia adotada no presente trabalho

4.2 Modelagem computacional

Após a aquisição e aferição dos dados do sistema elétrico, o passo subsequente está relacionado à modelagem computacional do mesmo. Seus parâmetros servirão como dados de entrada para um programa de simulação de sistemas elétricos em regime permanente. O software a ser usado precisa ser robusto o suficiente para manipular uma grande quantia de variáveis e ser sofisticado o bastante para entregar a resposta da simulação com dados de saída confiáveis e precisos. Como um SD de energia elétrica pode ter um grande número de nós, um caso de simulação de falta no mesmo, por exemplo, pode gerar um grande número de variáveis de saída.

No procedimento adotado por este trabalho, o *software* de simulação escolhido foi o ATP via *interface* gráfica ATPDraw. Os programas e suas principais características foram explanados no capítulo 2 do presente documento. A Figura 4.2 ilustra um sistema elétrico exemplo modelado no *software* ATPDraw. Posteriormente, seus elementos serão apresentados em maiores detalhes com relação a suas características e parâmetros considerados.

Figura 4.2 - Sistema elétrico exemplo representado na interface gráfica ATPDraw.

No caso da simulação dos sistemas teste do IEEE, os dados e os importantes parâmetros para sua caracterização foram obtidos através de relatórios (IEEE-PES, 2000-2010). Nestes documentos, o fluxo de potência do SD em questão é descrito para a possibilidade da sua validação mesmo quando modelados em softwares de simulação diferentes. Os sistemas são de grande utilidade para estudos em sistemas elétricos radiais, pois cada um deles possui características específicas que representam situações diversas impostas por diferentes topologias e níveis de tensão encontrados em SDs em campo (reais).

4.3 Simulação de faltas

Como descrito no capítulo 2 deste trabalho, na seção dedicada às VTCDs, estes distúrbios são, em sua grande maioria, causados por dois motivos distintos: manobras de grandes blocos de cargas e ocorrências de curtos-circuitos ao longo dos alimentadores do SD. No entanto, como os problemas causados por manobras de grandes cargas são geralmente solucionados na parte referente ao seu projeto e operação, os fenômenos utilizados para o estudo das VTCDs nos SDs analisados serão as possíveis faltas em seus nós que possam causar afundamentos de tensão.

As primeiras possíveis contribuições relacionadas à execução desta metodologia estão na consideração da resistência e tipo de falta utilizados. O tipo de falta a ser utilizado para a análise da robustez do sistema que fornecerá as localizações dos monitores, será tomado a partir de um estudo das situações de curtos-circuitos sobre o SD em análise, e cada nó terá uma resistência de falta definida de acordo com o máximo valor que venha a caracterizar um afundamento de tensão no nó em questão.

Trabalhos como Kempner (2012) e Ibrahim, Mohamed e Shareef (2011) utilizam faltas trifásicas francas em suas metodologias para o encontro de esquemas de alocação otimizada de monitores que registram afundamentos causados por faltas. Porém, na perspectiva do presente trabalho, essa consideração pode não ser suficiente para o monitoramento total desse distúrbio. Tal conclusão pode ser inferida por um exemplo, discutido a seguir, o qual dará embasamento para os próximos passos adotados na metodologia em discussão.

Faltas trifásicas francas são os curtos-circuitos mais severos em SDs, ocasionando intensos afundamentos que se propagam largamente nos nós do

sistema de acordo com sua topologia (Kempner, 2012). Caso os esquemas de alocação sugeridos sejam baseados neste cenário, a quantidade de monitores será insuficiente em relação à quantidade necessária para observar todos os possíveis afundamentos. O motivo disso está relacionado à quantidade de nós afetados (que apresentam afundamentos de tensão) para uma falta genérica trifásica franca. Quanto maior a quantidade de nós afetados pelo distúrbio, menos monitores serão necessários para a observação do fenômeno. Contrariamente, caso uma falta de menor severidade como, por exemplo, um curto-circuito monofásico com uma resistência de falta diferente de zero venha a ocorrer, a alocação dada pelo estudo com faltas trifásicas francas pode não conter equipamentos o suficiente a fim de monitorar o afundamento causado. Outras considerações e detalhes em torno da discussão gerada serão apresentadas nos itens seguintes.

Considerando a situação descrita, trabalhos como o de Olguin e Bollen (2003) tentam melhorar a representação da distribuição de afundamentos de tensão em SDs. O objetivo do trabalho é utilizar o MMC para obter um conjunto de cenários de faltas com características distintas, considerando todos os tipos e diferentes resistências de falta. O resultado do processo é a simulação de uma grande quantidade de curtos-circuitos para a obtenção de um esquema de alocação que monitore todos os afundamentos causados pelos cenários simulados, que, estatisticamente, deveriam representar uma resposta adequada do sistema para todos os cenários desse distúrbio. Porém, apesar de funcional, a quantidade de curtos-circuitos simulados é muito grande, exigindo um alto esforço computacional do algoritmo de otimização para o encontro da solução para a alocação dos monitores. Não que isso seja necessariamente um problema, já que o estudo de alocação otimizada não tem a velocidade na obtenção de uma resposta como prioridade, mas o presente trabalho defende o ponto de que ao invés de utilizar um método estatístico (MMC) para a obtenção da quantidade e distribuição de faltas no SD, um caminho determinístico pode ser tomado sem a necessidade da simulação de diversos cenários aleatórios. Assim, a presente metodologia caminha em uma direção diferente dos métodos apresentados, escolhendo o tipo de falta menos severo possível (de menor intensidade) e com a maior resistência de falta possível, de maneira que a situação ainda seja responsável por um afundamento no nó onde foi simulada a falta. Para isto, um estudo preliminar deve ser realizado no SD analisado a fim de encontrar esses dois parâmetros necessários para a execução de tal método.

Para o encontro do tipo de falta menos severa, foram escolhidos pontos de interesse distintos ao longo dos alimentadores onde foram aplicados todos os tipos de falta, e, através de uma análise da tensão residual nos nós do sistema, o tipo de falta que menos afetou (causou afundamento) foi adotado para o estudo desse distúrbio. Como esperado, o tipo de curto-circuito determinado para todos os sistemas foi do tipo monofásico com resistência de falta diferente de zero. Adicionalmente, considerações sobre as fases envolvidas também foram tomadas, escolhendo assim, a fase mais robusta para a análise da propagação dos afundamentos no SD (cada sistema com uma fase distinta analisada).

No estudo da máxima resistência de falta a ser considerada para a simulação dos curtos-circuitos, um leque de 0 até 50Ω foi considerado com as possíveis resistências dividas em intervalos de 10Ω , ou seja, os valores adotados foram de 0, 10, 20, 30, 40 e 50Ω . O fim do intervalo foi escolhido pela observação de referências como Neto-Tonelli, Decanini e Minussi (2011), que utilizam 50 ohms para determinar o limite do valor de resistências que caracterizam faltas de baixa impedância em SDs. O processo deve ser executado para cada nó do alimentador escolhido, resultando em uma resistência específica para cada um dos mesmos.

As simulações, como já mencionadas, serão executadas via o *software ATPDraw*, que quando integrado com o programa ATP, e a um programa de confecção gráfica, apresentará as tensões residuais nos diferentes nós do sistema para uma situação de falta aplicada. A Figura 4.3 mostra a situação descrita após a simulação de uma falta genérica na fase C do SEP anteriormente apresentado na Figura 4.2.

Através das estratégias formuladas para as simulações de faltas que serão utilizadas na construção do banco de dados para a entrada do algoritmo de otimização, pode-se garantir a observação dos afundamentos em sua quase totalidade. A validação de tal afirmação será aferida pela aplicação do MMC, para todos os tipos de falta e diferentes resistências de falta que causem afundamento de tensão.

Figura 4.3 - Simulação de uma falta genérica na fase C do SEP anteriormente apresentado.

4.4 Construção da Matriz de Tensão Durante a Falta e Matrizes de Cobertura

Sabendo que os curtos-circuitos estão entre as maiores causas das VTCDs, o presente trabalho, como discutido, utilizará o artifício da simulação de faltas para encontrar esquemas otimizados de alocação de MQEES em SDs radiais. Neste sentido, o principal objetivo da produção desses cenários é o estudo das tensões remanescentes nos diversos nós do sistema quando há uma falta em um ponto em particular que cause afundamento ao longo do alimentador. O estudo resultará em uma análise sobre a vulnerabilidade/robustez dos nós do SD frente aos afundamentos de tensão que podem se propagar em sua topologia. Quando um nó do sistema estudado tem sua tensão remanescente abaixo do limiar estabelecido para ativação dos MQEES frente às diversas faltas passíveis de ocorrência no SD que causam afundamentos de tensão, este se torna um bom candidato para um ponto de alocação. A instalação de equipamentos em nós com essa característica consegue, através de

um único monitor, observar diversos fenômenos de afundamentos de tensão no sistema sem a necessidade da instalação de monitores em cada barra de ocorrência.

4.4.1 Matriz de Tensão Durante a Falta

Para o estudo dessa robustez característica dos SDs, o conceito de Matriz de Tensão Durante a Falta (MTDF) será estabelecido. Conforme apresentado por Olguin e Bollen (2003), esta matriz descreve o comportamento das tensões residuais (remanescentes) em todos os nós do sistema para um tipo definido de curto-circuito quando aplicado em todos os pontos do sistema. Cada coluna está associada a uma localização específica de falta, mostrando como o afundamento se propaga ao longo do alimentador analisado. Cada linha se refere às tensões observadas em um determinado nó quando os diversos nós do alimentador estudado estão sobre o efeito de uma falta de um tipo específico adotado. Na intenção de exemplificar melhor este conceito, considere um sistema exemplo de distribuição, simples e radial, como apresentado na Figura 4.4. Nesse sistema, um curto-circuito sólido (franco) é aplicado no nó de número 3 e as tensões em regime permanente remanescentes dadas em p.u. estão ilustradas juntamente aos nós do sistema. A MTDF que representa as tensões durante a falta para curtos-circuitos sólidos no sistema exemplo pode ser ilustrada pela Tabela 4.1. Como explicado, a coluna 3 da matriz representa as tensões residuais observadas nos nós para uma localização de falta específica, o caso do exemplo da Figura 4.4 é destacado em negrito na matriz exemplificada.

4.4.2 Matriz de Cobertura

A MTDF traduz, de certa forma, a vulnerabilidade dos nós do sistema frente às diferentes localizações dos curtos-circuitos aplicados nos pontos do alimentador estudado. Inferindo assim, sobre sua robustez e sensibilidade dos seus nós frente aos possíveis afundamentos de tensão causados pelo tipo de falta adotado.

Figura 4.4 – Sistema exemplo de distribuição de 6 nós.
Fonte: Ibrahim, 2011.

Tabela 4.1 – MTDF do sistema exemplo para faltas francas.

0	0,82	0,94	0,98	0,98	0,98	0,95
0	0	0,47	0,65	0,91	0,66	0,48
0	0	0	0,35	0,67	0,34	0,43
0	0	0	0	0,32	0,28	0,37
0	0	0	0	0	0,23	0,32
0	0	0	0,29	0,61	0	0,28
0	0	0,41	0,58	0,85	0,59	0

No presente trabalho, o fator determinante na avaliação da instalação de um monitor será dado através da sua área de cobertura, conceito este, que pode ser entendido como a área da rede onde, mediante a qualquer situação de afundamento de tensão causado pelo curto-circuito evidenciado, possa ser observada ou não por um monitor específico. Para sua caracterização, a Matriz de Cobertura (MCo) será utilizada a fim de delimitar a área de cobertura dos monitores instalados. Sua construção pode ser dada através de uma matriz binária na qual o valor 1 da entrada (j,k) da matriz, indica que o ponto k é coberto pelo MQEE instalado na barra j , e o valor 0 indica que aquele ponto está fora da cobertura deste monitor, conceito definido por Ibrahim, Mohamed e Shareef (2011). Sendo assim, a MCo é dada pela comparação da tensão remanescente no nó, entregue pela MTDF, com um limite de tensão escolhido. Usualmente, como citado em Matz et al. (2007), um MQEE detecta afundamentos de tensão comparando o valor RMS em p.u. da tensão medida com um valor limite, sendo o valor mais comumente usado o de 0.9 p.u., principalmente por ser o limiar superior de definição de um afundamento de tensão. No entanto, no

desenvolvimento do presente trabalho, diferentes limiares serão adotados no decorrer da aplicação da metodologia, a fim de explorar as diferentes características das respostas observadas decorrentes desse processo. As implicações dessas alternativas serão discutidas posteriormente neste documento. A construção da MCo expressa por (1) e pela Tabela 4.2 ilustra a MCo do sistema exemplo, apresentado anteriormente.

$$MC_{(j,k)} = \begin{cases} 1, & \text{se } T_{(k,f)} \leq \alpha \text{ p.u. em qualquer fase} \\ 0, & \text{se } T_{(k,f)} > \alpha \text{ p.u. em qualquer fase} \end{cases} \quad (1)$$

Sendo:

α o limite de tensão para a observação escolhida; e

$T_{(k,f)}$ a tensão na barra k dada uma falta em f .

Tabela 4.2 – MCo para o sistema exemplo.

1	1	0	0	0	0	0
1	1	1	1	0	1	1
1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1

A alocação dos equipamentos a fim de monitorar os possíveis afundamentos de tensão será dada através da análise da matriz apresentada, a qual indicará as localidades que observarão os afundamentos de tensão aplicados sobre o SD. Uma análise simplista da área de cobertura de alguns nós apresentados na Tabela 4.2, por exemplo, pode sugerir pontos de alocação de monitores para este sistema. Essa análise é dada através da observação das linhas da matriz, na qual é possível observar como um monitor instalado em um nó específico do sistema iria observar os possíveis afundamentos de tensão causados pelas faltas simuladas nos outros pontos do alimentador. Caso um monitor seja instalado no nó de número 2 do sistema exemplo, este conseguiria observar afundamentos causados por curtos-circuitos francos em quase todos os nós do sistema, exceto pelo nó de número 5. Desse modo,

monitores instalados nos nós de número 3, 4, 5, 6 e 7 observariam todos os possíveis afundamentos causados por faltas sólidas no sistema (fato observado através das linhas da MCo). Para este tipo de curto-circuito, o número mínimo de monitores para registrar os possíveis afundamentos seria de 1 monitor instalado em qualquer um dos nós citados anteriormente.

Então, analisando as linhas da MCo, é possível encontrar esquemas de instalação de monitores que consigam observar todos os possíveis afundamentos causados pelo tipo de falta adotada. Afinal, através das mesmas, é possível verificar quais nós são monitorados quando o cenário de falta escolhido é aplicado em outros pontos do alimentador, representando assim, quanto o local de instalação analisado é vulnerável frente a afundamentos em diferentes nós. Por esse motivo, as linhas da matriz serão referidas neste trabalho com a *Área de Vulnerabilidade* da Matriz de Cobertura.

4.4.3 Matriz Topológica de Cobertura

A análise feita nos parágrafos anteriores é simplista demais para caracterizar um esquema de alocação de monitores a fim de monitorar todos os possíveis afundamentos de tensão. Em um programa de monitoramento, a configuração da alocação de MQEEs deve dar informação o suficiente para a localização da fonte do afundamento de tensão que parece estar perto do monitor a ser sensibilizado (Chang, et al., 2007). No entanto, as tensões medidas nos nós 4, 5 e 6 no sistema exemplo ilustrado pela Figura 4.4, induz que a falta também ocorre nas barras citadas, o que simplesmente não é verdade, já que a situação de curto-circuito em análise foi aplicada na barra 3. Sendo assim, cabe adiantar que os valores zeros nos elementos fora da diagonal principal da MTDf são resultados de variações topológicas no sistema. Portanto, para expressar de maneira mais adequada a variação topológica do sistema, a Matriz Topológica de Cobertura (MTC) foi criada e será relevante para o desenvolvimento da presente metodologia. A MTC generaliza o conceito da MCo e é aplicável para todos os SEPs, principalmente para os de distribuição com característica radial, pois estes são os mais afetados pelas variações topológicas. Similar a MCo, a MTC pode ser construída atribuindo-se o valor 1 quando a tensão residual for menor ou igual ao limite escolhido, e 0 caso contrário. Porém, se a tensão residual for exatamente 0 p.u. na barra monitorada (j), e esta for diferente da barra em

que está sendo aplicada a falta (k), o valor correspondente na matriz deve também ser 0, como conceituado por Ibrahim, Mohamed e Shareef, (2011). A construção dessa matriz pode ser expressa por (2), e como resultado, todos os nós situados a montante da localização da falta não serão considerados como apropriados para monitorar a falta especificada. A nova MTC pode influenciar de grande maneira a alocação dos MQEEs quando comparada com a MCo, como pode ser observado na Tabela 4.3, que representa a MTC do sistema exemplo.

$$MC_{(j,k)} = \begin{cases} 1, \text{ se } T_{(k,f)} \leq \alpha \text{ p. u. em qualquer fase} \\ 0, \text{ se } T_{(k,f)} > \alpha \text{ p. u. em qualquer fase} \\ 1, \text{ se } T_{(k,f)} = 0 \text{ p. u. para } j \neq k \end{cases} \quad (2)$$

Tabela 4.3 – Representação da MTC do sistema exemplo apresentado.

1	1	0	0	0	0	0
0	1	1	1	0	1	1
0	0	1	1	1	1	1
0	0	0	1	1	1	1
0	0	0	0	1	1	1
0	0	0	1	1	1	1
0	0	1	1	1	1	1

Considerando a matriz de cobertura representada pela nova abordagem apresentada, um estudo sobre suas áreas de vulnerabilidade indicará que somente um monitor, não será o suficiente para monitorar todos os afundamentos causados pelo tipo de falta adotado. Para a atual situação, o esquema de instalação dos equipamentos deve conter no mínimo dois monitores, sendo que um deles deve ser alocado no nó de número 1. O seguinte pode ter diferentes possibilidades de instalação, sem a alteração da eficiência do sistema de monitoramento pela metodologia adotada até o presente momento. As possibilidade de instalação indicam os nós de número 3 ou 7.

Pela abordagem da nova matriz de cobertura apresentada, todos os afundamentos causados por faltas do tipo trifásica franca serão monitorados. Sendo assim, a consequência dessa nova visão sobre a matriz de cobertura traz mais

informações sobre a localização da falta que causou o afundamento de tensão do que a abordagem inicial.

4.4.4 Matriz Topológica de Cobertura Sugerida

A alteração na metodologia da MCo apresentada no item anterior vem ao encontro da melhora na complementação os dados de entrada do processo de otimização que serão utilizados para o encontro dos esquemas de alocação de MQEEs em SDs para o monitoramento das VTCDs. Entretanto, a presente pesquisa tem a intenção de sugerir uma modificação para sua construção, a qual terá grande relevância na resposta do esquema de alocação do sistema de monitoramento. Muito parecida com a abordagem apresentada anteriormente, a modificação sugerida consiste em não somente retirar os nós que não representam a realidade sobre a localização da falta observada, mas como também melhorar a observação das tensões em regime permanente do sistema de acordo com as variações topológicas do alimentador. Monitorando assim, uma quantidade maior de clientes e alocando monitores de uma maneira mais adequada em relação a sua topologia.

O caso anterior pode servir como exemplo para justificar essa sugestão. Como citado, a alocação de monitores para o sistema exemplo simples, utilizando sua MTC para a alocação de monitores, deve ser feita de duas maneiras diferentes para a alocação da quantidade mínima de equipamentos: nós #1 e #3 ou nós #1 e #7. Porém, mesmo que esses dois esquemas tenham a mesma eficiência ao serem sensibilizados por afundamentos causados por faltas francas em todos os nós do sistema, o esquema de alocação que contempla a instalação no nó #3 é melhor por uma série de motivos. A instalação do monitor no nó #7 somente terá informações sobre a QEE daquele ponto em específico porque está localizado no final de um ramal. Mesmo que registre um afundamento de tensão, a tensão aferida não poderá ajudar na localização da falta como a instalação feita no nó #3. A alocação que contempla tal ponto, consegue monitorar uma área maior, caso um monitor seja instalado a jusante desse nó. A localização da falta, caso seja feito um estudo nesse sentido, poderá ser mais eficiente, entre outras razões topológicas, para esta última configuração.

Através da maneira que os dados de entrada foram expostos até agora, caso fossem utilizados em um processo de otimização, há uma grande probabilidade de

que os monitores sejam alocados no fim dos ramais dos alimentadores, situação que pode não ser interessante para o sistema de monitoramento, dados os objetivos considerados e a provável menor observabilidade associada do sistema elétrico como um todo. A razão disso está relacionada às tensões residuais nesses nós. Estas são facilmente sensibilizadas por afundamentos em outras barras e o método de otimização enxergará esses pontos como bons locais para a alocação, uma vez que sua área de vulnerabilidade terá muitos pontos sensíveis.

Sendo assim, a sugestão apontada por esse trabalho está na adição de uma restrição topológica para a criação da MTC descrita anteriormente. Além da restrição sobre os zeros fora da diagonal principal da MTDF, esta nova regra limita que os monitores instalados possam somente monitorar nós que estejam situados a jusante do ponto de instalação. Consequentemente, o nó #7 não seria visto como um nó interessante para a instalação, uma vez que este se situa no fim de um ramal e não há pontos a jusante para serem observados dada topologia do sistema exemplo.

Dito isso, a criação da MTC com esta sugestão pode ser dada por (3), na qual os casos de restrição topológica serão verdadeiros toda vez que o nó k a ser observado estiver a montante do nó j . Assim, mesmo que este seja sensibilizado por uma falta em k , seu elemento na matriz deve ser igual à zero. A Tabela 4.4 representa a nova MTC com a sugestão para o sistema exemplo simples.

Caso um novo estudo sobre as áreas de vulnerabilidade da MTC com a restrição sugerida contemplada em sua construção seja feito, apenas um esquema de alocação com dois monitores pode ser realizado de maneira que observe todos os afundamentos causados pelo tipo de falta adotado. Este se refere ao caso citado anteriormente de monitores instalados nos nós de número 1 e 3. Pode-se perceber que caso uma falta aconteça na zona definida pelas localizações de instalação com fronteira delimitada pelos dois monitores, um possível estudo da localização deste distúrbio pode ser facilitado através da análise das correntes e tensões dos dois monitores durante a falta.

$$MTC_{(j,k)} = \begin{cases} 1, & \text{se } T_{(k,f)} \leq \alpha \text{ p.u. em qualquer fase} \\ 0, & \text{se há um caso de restrição topológica} \\ 0, & \text{se } T_{(k,f)} > \alpha \text{ p.u. em qualquer fase} \end{cases} \quad (3)$$

Tabela 4.4 – MTC construída com a restrição sugerida.

1	1	0	0	0	0	0
0	1	1	1	0	1	1
0	0	1	1	1	1	1
0	0	0	1	1	1	1
0	0	0	0	1	0	0
0	0	0	0	0	1	0
0	0	0	0	0	0	1

Apesar de não contemplar a localização de faltas como um de seus objetivos, a presente pesquisa leva em consideração essa consequência como um forte indicativo para a sua continuidade. Neste sentido, um maior suporte a futuros estudos que tenham esse objetivo em seus métodos poderá ser evidenciado através da tentativa de fornecer esquemas de alocação de monitores que sejam mais bem distribuídos ao longo do alimentador.

Contudo, vale ressaltar que a metodologia descrita até o momento, foi exemplificada através do sistema exemplo simples, considerando somente um tipo de falta (trifásica franca). Vale lembrar que quando aplicada aos sistemas teste para a validação do método, os tipos de faltas adotados serão os de menor severidade (os que causem menores quedas de tensão ao longo do alimentador). E que, ao levar em consideração um tipo de curto-circuito mais brando, o sistema de monitoramento deverá não somente ser capaz de observar afundamentos de tensão gerados por faltas francas, mas como também para qualquer tipo de falta aplicada. A aplicação dessa afirmação será feita no final do trabalho através da aplicação do MMC.

4.4.5 A consideração de diferentes limiares de tensão

Ao utilizar o presente método para o encontro dos esquemas otimizados de alocação de MQEEs, o usuário pode se deparar com duas situações específicas envolvendo problemas com a resposta do método, a saber:

- O método sugeriu uma pequena quantidade de monitores porque o sistema tem seus afundamentos de tensão facilmente monitorados e a empresa/concessionária de energia tem a intenção de melhorar o

sistema de monitoramento através de investimentos excedentes, instalando mais equipamentos; e

- O método sugeriu uma quantidade numerosa de monitores e a empresa/concessionária de energia não tem interesse de fazer um investimento inicial grande o suficiente para a compra de todos os equipamentos.

O primeiro problema a ser explanado neste item será referente à situação que indica um esquema de alocação com um menor número de monitores em relação a quantidade de investimento destinada ao sistema de monitoramento. O referido problema geralmente ocorre em SDs que contemplam uma tensão em regime permanente mais elevada. Desta maneira, o sistema teste de 34 nós será utilizado para exemplificar essa situação, que além de ser um alimentador muito extenso, contempla uma tensão de distribuição de 24,9kV em sua rede primária.

No SD citado, mesmo sendo constituído por 34 nós, conforme será posteriormente apresentado, apenas três monitores são suficientes para monitorar os afundamentos de tensão ao longo do seu alimentador pela metodologia desenvolvida. No desenvolvimento da atual pesquisa, essa situação foi considerada como um cenário no qual a empresa/concessionária pode desejar a melhoria ou expansão do sistema de monitoramento adicionando monitores excedentes ao longo do alimentador, e por esse motivo, uma estratégia foi criada com o objetivo de representar pontos no sistema que seriam bons candidatos para a instalação de monitores levando em conta a robustez no SD analisado.

Com esse propósito, a definição de *Área Afetada* será estabelecida como a quantidade de pontos no SD em estudo que será sensibilizada por uma falta específica simulada. Através de uma breve análise, é possível inferir que a quantidade de entradas com valor 1 (um) na MTC irá depender diretamente do limiar estabelecido na sua construção. Quanto maior o limite de tensão adotado, mais nós serão sensibilizados, e, conseqüentemente, maior será a área afetada do SD estudado.

A Tabela 4.5 representa o sistema exemplo apresentado com um limiar de tensão estabelecido em 0,7 p.u.

Sendo assim, caso o limiar seja diminuído, menos entradas (caracterizadas pelos valores uns) existirão na matriz, havendo uma redução da sua área afetada e

Tabela 4.5 – Representação da MTC do sistema exemplo com um limiar de tensão estabelecido em 0,7 p.u.

1	0	0	0	0	0	0
0	1	1	1	0	1	1
0	0	1	1	1	1	1
0	0	0	1	1	1	1
0	0	0	0	1	0	0
0	0	0	0	0	1	0
0	0	0	0	0	0	1

acarretando numa exigência maior por parte do sistema de monitoramento para a garantia da observação de todos os afundamentos que o sistema possa enfrentar. Desse modo, com um menor limiar de tensão e área afetada reduzida, a quantidade mínima de monitores para aferição dos distúrbios tende a aumentar.

Diferente da matriz topológica de cobertura representada pela Tabela 4.4, a nova MTC da Tabela 4.5 tem uma menor quantidade de valores iguais a 1 (um), resultado da diminuição da área afetada pelos curtos-circuitos simulados para um menor limiar de tensão considerado. Em consequência, dois monitores não são mais suficientes para garantir a observação dos afundamentos de tensão causados pelo tipo de falta adotado, pois se percebe que o monitor anteriormente instalado no nó #1 perde a capacidade de monitoramento referente ao nó #2 (elemento da linha 1 e coluna 2). Nesses casos, outro equipamento deve ser alocado a fim de assegurar o monitoramento do nó que deixou de ser monitorado. Sendo assim, como o único ponto capaz de observar afundamentos de tensão no nó #2, para a MTC com o novo limiar, é o próprio nó #2, um terceiro monitor será alocado neste ponto.

Vale ressaltar que, tal análise não necessariamente indica que os monitores devam ser parametrizados, em sua instalação, com um limiar de tensão abaixo ou diferente de 0,9 p.u.. Essa orientação deve ser vista como um artifício voltado ao estudo da robustez do sistema frente aos afundamentos de tensão resultantes das simulações de falta, podendo assim, ser utilizado na escolha de pontos de instalação para os equipamentos excedentes, que podem monitorar uma grande quantidade de ocorrências. A inclusão desses nós adicionais no esquema de alocação dos MQEEs, aprimora uma característica do sistema de monitoramento conhecida como

Redundância das Medidas. Esta será definida pela quantidade de vezes que o mesmo evento será registrado por diferentes monitores. Consequentemente, como objetivo secundário, a intenção da maximização dessa grandeza surge na presente metodologia, pois está relacionada com o aumento da confiabilidade do sistema de monitoramento, uma vez que há a possibilidade de defeito nos monitores instalados e a ocorrência de um distúrbio que não seria mais observado poderá ser registrada por outro instrumento.

Para o estudo de diferentes áreas afetadas, durante a análise dos sistemas testes na aplicação da presente metodologia, serão adotados limiares de tensão distintos quando houver a intenção de descobrir pontos adicionais para alocação de monitores. Os valores dos limites de tensão serão variados de 0.5 p.u. até 0.9 p.u., em intervalos de 0.1 p.u., modificando o tamanho das áreas afetadas pelas faltas aplicadas, e, consequentemente, a quantidade de monitores requeridos para garantir o monitoramento de todos os curtos-circuitos que possam causar afundamentos de tensão.

Como o tipo de falta utilizado na simulação de curtos-circuitos no sistema exemplo é franca (sem consideração da resistência de falta), os elementos da diagonal principal da MTDF serão sempre iguais à zero. De forma contrária, quando uma impedância de falta diferente de zero é adotada na simulação, as tensões pós-falta desses elementos deverão ser diferentes, muitas vezes próximas do limiar de tensão adotado na construção da MCo. Portanto, caso esse artifício seja utilizado para a construção de MCos ou MTCs e tipos de faltas menos severos forem escolhidos, alguns nós do sistema podem ter sua observação de afundamentos impossibilitada.

4.4.6 Matriz Genérica de Cobertura

Para melhor exemplificação do problema citado ao final do item anterior, a Tabela 4.6 representa a MTDF do sistema exemplo quando um tipo de falta monofásica, com resistência de falta diferente de zero, é adotado.

Para a MTDF representada, caso um limiar de tensão de 0,6 p.u., por exemplo, seja considerado na construção da MTC, a primeira coluna da matriz não teria nenhum 0 (zero) contido em suas entradas. Isso, obviamente, significa que nenhum nó conseguiria assegurar o monitoramento de VTCDs para o primeiro ponto.

Tabela 4.6 - MTDF do sistema exemplo considerando uma falta monofásica com resistência de falta.

0,71	0,73	0,77	0,78	0,80	0,78	0,81
0,70	0,69	0,72	0,74	0,76	0,73	0,78
0,68	0,67	0,66	0,68	0,70	0,67	0,72
0,67	0,65	0,66	0,65	0,67	0,67	0,68
0,65	0,63	0,62	0,61	0,60	0,63	0,62
0,68	0,66	0,65	0,65	0,66	0,58	0,65
0,69	0,67	0,67	0,67	0,68	0,68	0,68

Apesar disso, tal fato não necessariamente expressa que o nó #1 não registrará a ocorrência de um afundamento quando o distúrbio acontecer em sua localização, pois o novo limiar adotado para esse caso é diferente do valor limite que os monitores serão programados para o início do registro dos distúrbios (0,9 p.u.). Como sugestão diferenciada por esta metodologia, a apresentação de um recurso para o contorno desse problema será dado através de uma nova matriz, chamada de Matriz Genérica de Cobertura (MGC).

Sabe-se então que uma das restrições do algoritmo de otimização utilizado é a garantia que todos os nós serão observados por pelo menos um monitor na presença de um afundamento. Tal situação pode não ocorrer com a diminuição do limiar de tensão e área afetada, onde alguns nós podem perder a capacidade de serem observados (situação anteriormente apresentada). Para estes caso, MGC foi criada a fim de lidar com o problema. Sua construção é dada através do novo limiar adotado, no entanto, caso a MTC tenha alguma coluna com todos os elementos iguais a zero (impossibilitada de ser monitorada), não sendo responsável por nenhum afundamento com tensão residual abaixo do limiar de tensão, a MGC para o novo limiar considerado será construída sem a coluna referente ao problema. Posteriormente, os espaços vazios, são preenchidas por valores referentes à mesma coluna dada uma MTC com limiar maior na qual o problema ainda não era detectado. Por exemplo, caso o problema seja observado em uma certa coluna da matriz com o novo limiar de 0,6 p.u., a mesma será construída sem valores, e posteriormente, suas entradas serão preenchidas valores referentes a um caso que o problema ainda não era constatado (MTC com limiar de 0,7 p.u.).

Essa nova matriz substituirá a MTC como entrada no algoritmo de otimização, afinal, caso a mesma fosse utilizada, o algoritmo não convergiria devido a sua restrição ao monitoramento de todas as barras por pelo menos um monitor. Sua única função será possibilitar a continuação do estudo da diminuição da área afetada pelos afundamentos com a intenção de encontrar bons locais para a instalação de monitores excedentes. Apesar da fácil possibilidade de confusão no processo de construção dessas matrizes, suas construções, utilizações e importância serão melhor compreendidas no capítulo referente aos resultados do presente trabalho.

4.4.7 Aumento da área classificada como afetada

O artifício previamente discutido tem sua utilidade mais relevante para alimentadores de SDs com tensões características mais elevadas, como o alimentador teste de 34 nós do IEEE (tensão nominal de 24,9kV). Afinal, quando uma mesma resistência de falta é considerada sobre todo o sistema, os curtos-circuitos têm sua severidade proporcional ao valor da tensão nominal do sistema, influenciando na propagação dos afundamentos de maneira mais intensa ao longo do alimentador, tornando-se assim, mais fáceis de serem monitorados por outros nós.

Apesar da relevante estratégia apresentada no item anterior, a grande maioria dos sistemas de distribuição presentes no cenário urbano brasileiro contemplam uma tensão nominal de 13,8kV. Tal quadro proporciona menores afundamentos nas tensões pós-falta quando comparado com sistemas de maior tensão, como o de 24,9kV, podendo resultar no segundo problema citado no item 4.4.5 deste capítulo, o qual diz respeito a quantidade excedente de monitores sugeridos em relação à quantia existente ao investimento inicial a ser disponibilizado pela empresa/concessionária.

Por ser criterioso e considerar os casos de curtos-circuitos mais brandos possíveis, o método proposto por vezes pode indicar uma resposta para o esquema de alocação que contém uma larga quantidade de monitores para sistemas de menor tensão nominal. Casos assim podem não ser desejados, pois geralmente estão ligados a um alto investimento inicial para o monitoramento das possíveis VTCDs passíveis de ocorrência no SD. Pensando nisso, outro artifício foi construído com o objetivo de diminuir a quantidade de monitores, e ainda assim, associar um boa confiabilidade ao sistema de monitoramento.

No processo de escolha da resistência de falta utilizada nas simulações dos curtos-circuitos, o valor adotado é referente à resistência de maior valor que venha a causar um afundamento no nó analisado. Pois assim, uma vez garantida a observação para casos menos severos (que propagam afundamentos com a menor intensidade), se torna possível o monitoramento para todos os tipos de falta, validação esta que fará parte dos resultados apresentados.

Desta maneira, como os casos mais brandos possíveis são só uma pequena parte da distribuição estatística de eventos de falta passíveis de ocorrência em um SD, alguns monitores só aparecem no esquema de alocação, porque a tensão residual do nó referente ao local de instalação pós-falta teve sua magnitude muito próxima do limiar escolhido. Alguns desses equipamentos estão alocados apenas para identificar afundamentos muito específicos em finais de ramais. Nesse sentido, um artifício pode ser usado para aumentar levemente a área afetada e tentar identificar esses monitores.

Como será visto, na apresentação dos resultados referente ao sistema real utilizado na aplicação desta metodologia, a quantidade de equipamentos com finalidade de monitorar todos os cenários de afundamentos menos severos foi relativamente grande. Para tentar contornar esse quadro, sua área afetada foi ligeiramente aumentada através de uma pequena diminuição das resistências de faltas consideradas na construção da MTC. As faltas se tornam relativamente mais intensas frente aos nós do SD, e mais nós são sensibilizados por uma mesma falta. Tal modificação, mostrou influência na resposta dada pelo algoritmo de otimização através da diminuição da quantidade de monitores, e, conseqüentemente, interfere na eficiência do sistema de monitoramento, uma vez que mais pontos do sistema serão considerados para monitorar um afundamento que antes não era.

No entanto, no sentido de inferir sobre a influência dessa medida na eficiência do sistema de monitoramento, o MMC será utilizado. Através dele, uma grande quantidade de simulações de curtos-circuitos, em relação ao tamanho do alimentador, e com parâmetros estocásticos, será realizada com o intuito de descobrir uma proporção aproximada da quantidade de afundamentos que não serão observados pelos monitores, procurando evidenciar então, a influência e a eficiência do sistema de monitoramento quando diferentes limiares são considerados.

Outro ponto a ser esclarecido antes do término desse item, é a possível confusão sobre o monitoramento referente às VTCDs, já que apenas os afundamentos são tratados na metodologia proposta. Tal situação pode ser gerada pelo fato de que as VTCDs são classificadas basicamente em cenários de afundamentos, elevações e interrupções. No entanto, considerando que as principais causas de VTCDs em SDs são dadas por curtos-circuitos, como já discutido, a principal razão da existência de uma elevação de tensão está relacionada com a existência de uma falta desequilibrada entre fases, situação na qual há um afundamento em certas fases e possíveis elevações na(s) restante(s). Dito isso, sabendo que todos os possíveis afundamentos de tensão que são passíveis de ocorrência no alimentador tem monitoramento garantido, entende-se que a metodologia também pode ser utilizada na aferição dessas possíveis elevações, englobando assim todo o cenário de VTCDs, uma vez que interrupções também são consideradas. Afinal, tais fenômenos são caracterizados por cenários em que alguma das tensões tem valor residual abaixo de 10% do valor nominal e o método adotado garante monitoramento para tensões abaixo do limiar estabelecido.

4.5 Algoritmo genético

Algoritmos genéticos são poderosas ferramentas para a solução de problemas que podem ser de difícil solução via as técnicas tradicionais. Essa técnica emergente da computação inteligente, que retira da natureza a inspiração para encontrar soluções e realizar otimização em processos, mostra-se como um método interessante para a resolução do presente problema.

Vale ressaltar que abordagens como esta, utilizando AGs para a otimização da resposta para a alocação de monitores em sistema de transmissão e distribuição, já existem na literatura correlata. Pode-se citar, como exemplo de principais trabalhos que se utilizam da mesma linha, e que inspiraram fortemente este trabalho, trabalhos como de Cebrian, Almeida e Kagan (2010), Ibrahim, Mohamed e Shareef (2011), e Oleskovicz, et al. (2012). Para a construção do algoritmo, Linden (2012) foi utilizado como principal referência. O livro, além de ter de autoria brasileira, é acessível e com uma linguagem muito didática.

No tocante as diferentes abordagens de AGs possíveis, a escolha foi feita por um método simples e construído de maneira genérica. Os principais motivos relacionados à escolha estão ligados à validação do uso dos AGs em problemas de otimização no cenário de QEE, do presente problema de otimização ser binário (complexidade relativamente limitada), e da não priorização sobre o tempo de execução do processo de aplicação do método. Ainda que a escolha da ferramenta não possa ser afirmada como ótima, dada a formulação do problema, o estudo e a utilização desta ferramenta tem relevância considerável na formação profissional do autor, uma vez que AGs poderão ser posteriormente utilizados em um cenário mais complexo e em trabalhos futuros.

4.5.1 Função avaliação e objetivo

Após o tratamento e ajustes das matrizes de conectividade descritos, o AG utilizará a matriz de cobertura, seja a MTC ou MGC (MTC ajustada), como dado de entrada do processo de otimização.

O primeiro passo do algoritmo está na geração de uma população para o Vetor Alocação (VA). A população será binária e aleatória, na qual cada indivíduo representará uma sequência de alocação de monitores com número de equipamentos e posição de instalação distribuídas de maneira estocástica. Os VAs, indivíduos da população, apresentam tamanhos (quantidade de genes) iguais aos números de nós do sistema em análise. Cada posição desse vetor indicará a existência ou não de um monitor instalado, podendo assumir dois estados. A posição com valor igual a 1 (um), indicando a presença de equipamento naquele nó, e a ausência de um monitor no local, indicada pelo valor 0 (zero).

Sobre a quantidade de indivíduos adotados na população e os parâmetros gerais do AG, têm-se:

- Tamanho da população de 200 indivíduos;
- Cruzamento de um ponto;
- Seleção dos melhores indivíduos pelo método da roleta viciada;
- Mutação com taxa de 5% nas iterações iniciais e aumento do valor para expansão da diversidade em etapas próximas da convergência; e

- Presença de elitismo na mudança de gerações.

No tocante à presença do elitismo na população, sua função está relacionada à intenção da garantia de que o indivíduo com melhor adaptabilidade (valor avaliação) ao problema sobreviva ao processo de formação da próxima geração. Como o método de escolha dos pais é dado por um sorteio “viciado” (indivíduos com melhor avaliação serão escolhidos mais frequentemente), existe a possibilidade que o indivíduo com as melhores características não sobreviva, o que não é interessante no processo de otimização.

Após a geração da população, cada indivíduo é avaliado através de um valor que representa sua adaptabilidade ao problema e seu valor como resposta ao problema de otimização estudado, chamado de “valor avaliação” (*fitness*). No caso do presente algoritmo, a avaliação de cada indivíduo é feita por 3 níveis:

- A resposta dada pelo indivíduo não garante o monitoramento dos alicerces de todos os nós dado limiar adotado. A avaliação desse indivíduo é dado pelo inverso dos números de nós que ficaram sem monitoramento (valor máximo: 1). Não é considerado como resposta válida;
- O esquema de alocação representado pelo indivíduo garante o monitoramento mas este não contempla a menor quantidade de monitores observada como solução. O valor da avaliação é dado pelo inverso da quantidade de monitores indicados como solução, acrescido do valor 1 (um) (valor máximo: 1,5); e
- O indivíduo representa uma resposta com a quantidade mínima de monitores e deve receber maior valor de avaliação. Nesse caso, ainda há três subdivisões correspondentes a quem tem a melhor redundância das medidas. O que tiver melhor redundância terá avaliação igual ao inverso da quantidade de monitores, acrescido do valor 4 (quatro) (valor máximo: 5). O segundo melhor terá o valor 3 (três) acrescido e o último valor 2 (dois).

A função de avaliação e pesos associados as soluções encontradas foram formuladas pelo próprio autor no processo de construção do algoritmo. A convergência observada foi mais rápida quando um *ranking* de soluções do tipo criado

foi adotado. Os valores máximos descritos podem ser encontrados pelas situações de fronteira entre as definições das 3 classes.

A intenção de avaliar os indivíduos com um valor diretamente proporcional a sua adaptabilidade ao problema está ligado ao próximo passo, a escolha dos pais responsáveis pelo cruzamento e formação da próxima geração. O método escolhido para a seleção dos indivíduos que irão efetuar o cruzamento é chamado de Método da Roleta Viciada. Por este, a probabilidade de escolha do indivíduo está relacionada ao seu valor *fitness* associado. Quanto maior seu valor avaliação, mais chance um indivíduo terá de ser escolhido. Tal método de escolha permite que os indivíduos menos adaptados ainda possam ser escolhidos, mesmo com menores chances. A importância disso está relacionada com o fato de que os menos adaptados podem conter uma característica da resposta ótima mesmo com baixos valores de avaliação.

O processo de cruzamento dos indivíduos selecionados é feita de maneira simplificada através do Método do Único Ponto. Os indivíduos são separados em duas partes, as quais são compartilhadas a fim de formar um único novo indivíduo. A Figura 4.5 ilustra o processo de cruzamento, percebe-se que a prole terá características genéticas tanto do indivíduo 1, quanto do 2. Através da repetição desse processo, uma nova população de mesmo tamanho é formada.

Figura 4.5 – Processo de cruzamento pelo método de único ponto entre dois indivíduos.

Após o processo de cruzamento, o agente mutação é aplicado. Seu papel é simular a mutação genética aleatória passível de ocorrência no processo evolutivo dos seres vivos por diversos fatores, como, por exemplo, a influência do meio ambiente na formação de novas gerações. Dentro do algoritmo, sua existência garante uma

maior diversidade genética na população e auxilia o processo de otimização ao evitar o processo de convergência precipitada em um ponto ótimo local no espaço de busca.

Posteriormente, antes de avaliar a população novamente, o citado artifício chamado de elitismo é aplicado com o propósito de ajudar no processo de convergência do algoritmo. O mecanismo identifica o melhor indivíduo da geração passada e passa a repeti-lo pelo menos uma vez na próxima geração. Enquanto a mutação auxilia na diversidade da população, o elitismo ajuda na velocidade de convergência, guardando o melhor indivíduo identificado até então. Na presente pesquisa, esse artifício foi um fator essencial na fase final do processo de otimização.

Como passo final, o algoritmo avalia os parâmetros da população, como: valor médio da avaliação (que deve crescer conforme o algoritmo converge), máximo valor da avaliação, melhor indivíduo, melhor redundância das medidas e menor quantidade de monitores encontrada. Assim, novas populações poderão ser criadas e avaliadas, passando por diversas gerações. Quando não se encontra mais mudanças significativas no valor médio da avaliação da população ao passar das iterações, o algoritmo atinge a sua convergência.

Sua função objetivo pode ser expressa, matematicamente, pela forma simplista dada em (4), na qual se percebe que o principal objetivo do algoritmo é a minimização da quantidade de monitores contidos no vetor alocação. Adicionalmente, para ser avaliada como solução dado o problema de otimização, existe uma restrição relacionada ao fato de que um esquema de alocação de equipamentos deve monitorar afundamentos em todos os nós, dado um limiar de tensão, por pelo menos um monitor. Tal restrição é expressa por (5).

$$\min \sum_{n=1}^N VA(n) \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^N MGC(n, i) \times VA(i) \geq 1 \quad \forall n \quad (5)$$

Uma das vantagens do uso do algoritmo genético como ferramenta de otimização, está na possibilidade da apresentação das melhores, não somente uma única, soluções para o problema. Desse modo, é possível dentre as soluções que indicam a menor quantidade de monitores, escolher a opção com maior redundância

das medidas. Critério este, explicado como a quantidade de vezes que um mesmo distúrbio será monitorado por diferentes monitores, que deve ser maximizado, pois seu aumento associa maior confiabilidade ao sistema de monitoramento, uma vez que monitores alocados poderão monitorar os afundamentos mesmo quando da ausência devido a defeitos em de outro equipamento, por exemplo.

4.6 Método de Monte Carlo

Após a formulação dos dados de entrada, aplicação do algoritmo genético e obtenção das respostas para esquemas de alocação dos monitores, o MMC será aplicado a fim de validar as respostas através de uma inferência estatística.

Como descrito no Capítulo 2, Referencial Teórico, através do MMC descobertas sobre distribuições de probabilidades de eventos podem ser realizadas através da simulação de uma quantia de cenários grande o suficiente para representar um largo intervalo de confiança sobre o dado estatístico requerido. A aplicação do método na presente metodologia, consistirá na aplicação de diversas faltas com parâmetros aleatórios ao longo do alimentador em análise, aferindo assim, sobre a quantidade de eventos simulados que não foram monitorados.

Uma vez que a solução para a alocação do monitoramento é produto de um problema determinístico (formulação dos dados de entrada), todos os eventos, sem exceção, devem ser monitorados, por exemplo, para um limiar de 0,9 p.u. O MMC será aplicado para validar essa afirmação e descobrir a influência do artifício do aumento da área afetada sobre a eficiência do sistema de monitoramento.

Sobre os parâmetros aleatórios na simulação de curtos-circuitos ao longo do alimentador, pode-se citar:

- Local da falta: a localização da falta aplicada é aleatória com uma distribuição de probabilidade uniforme entre os nós;
 - Tipo de falta: a falta pode assumir todos os tipos de falta possível, sejam estes monofásicos, bifásico ou trifásico com ou sem envolvimento da terra. Distribuição de probabilidade também uniforme;
- e

- Resistência de falta: a resistência da falta será dada por um número aleatório variando de zero até o valor máximo de resistência que venha a causar um afundamento de tensão do nó considerado.

Vale ressaltar que apesar da distribuição de probabilidade do tipo de falta ter sido adotada como uniforme para as situações consideradas, a frequência destas não seguem a distribuição adotada. De uma maneira em geral, pode-se dizer que curtos-circuitos trifásicos acontecem apenas em 5% dos eventos de falta, bifásicos sem envolvimento com a terra 10%, a mesma frequência para bifásicos com envolvimento com a terra e 75% dos eventos são resultados de faltas monofásicas (Almeida e Kagan, 2010). No entanto, quando levado em consideração que a alocação dos monitores devem ser capazes de monitorar todos os tipos de falta, a consideração da distribuição de probabilidade uniforme é adequada para o estudo de todas as situações de uma maneira igualitária.

No tocante ao número de situações de curtos-circuitos aplicado, uma forma para o encontro desse número foi formulada e inspirada no trabalho de Short (2014). O mesmo é expresso por (6).

$$N_f = FR_{anual} \times L_{alimentador} \times 20 \text{ anos} \quad (6)$$

Sendo:

N_f	o número de faltas simuladas;
FR_{anual}	a taxa média de faltas por quilômetros de rede na região; e
$L_{alimentador}$	o comprimento em quilômetros do alimentador.

Assim, a parcela dada pela taxa média de falta por quilômetros de rede na região, multiplicado pelo comprimento do alimentador, diz respeito à quantidade média de curtos-circuitos que a rede pode sofrer em um ano. Esse número é multiplicado por 20 para a representação de uma quantidade de faltas que o sistema provavelmente observaria ao decorrer de um longo tempo, como, por exemplo, 20 anos.

O resultado do número de curtos-circuitos dado pela equação (6) define no presente trabalho, a quantidade mínima de simulações de falta que serão consideradas via o MMC. Contudo, entende-se que quanto mais amostras forem dadas, mais próximo da realidade estará o fator estatístico apresentado para a validação. Sendo assim, em sistemas menores, a quantidade de curtos-circuitos simulados foi maior do que o número mínimo, com a intenção de deixar o valor

estatístico ainda mais preciso. A quantidade de simulações realizadas em cada sistema será apresentada no capítulo de resultados.

A simulação de um número massivo de faltas de caráter aleatório só foi possível através de um algoritmo, programado em MATLAB, que gerasse os parâmetros estocásticos para a simulação das faltas e que interagisse com o *ATP* ao mesmo tempo. Cabe ressaltar que o algoritmo desenvolvido deve ser capaz de utilizar o parâmetro gerado como dado de entrada para uma simulação de falta, colher os resultados através de uma conversão dos dados de saída do *ATP* para um conjunto de tabelas em formato MATLAB, organizá-los e descobrir se o esquema de monitoramento a ser validado observa ou não o afundamento simulado.

4.7 Método simplificado

Através de normas regulamentadoras, como o PRODIST (ANEEL, 2016) no caso dos sistemas de distribuição brasileiro, bem como por informes técnicos por parte do setor de energia como um todo, é possível identificar um crescente anseio pelo aumento dos critérios que definam uma boa qualidade do produto. De maneira geral, o mesmo se repete internacionalmente no sentido do refinamento desses fatores que influenciam na qualidade da energia elétrica entregue ao consumidor final.

Não obstante, ao enxergar que o cenário atual está em constante mudança e a pressão por um aumento da qualidade do produto se tornará ainda maior, concessionárias se mostram cada vez mais preocupadas com o assunto, alocando mais investimentos para a melhoria de seus sistemas de monitoramento e para projetos de pesquisa e desenvolvimento, entre outros.

Sabe-se também, como anteriormente citado, que as VTCDs são os distúrbios relacionados à QEE que trazem mais danos financeiros para os consumidores finais, motivo pelo qual a alocação de MQEE se torna um assunto com crescente recorrência em eventos e publicações científicas. Entende-se também, que o conhecimento sobre técnicas inteligentes de otimização não são partes essenciais do currículo profissional de muitos responsáveis em empresas de distribuição de energia. Desse modo, a ideia da construção de um método simplificado para a alocação de monitores em ramais de distribuição foi recebida como uma boa possibilidade de contribuição científica, dado cenário cultural que as concessionárias se encontram atualmente no país.

No decorrer do estudo do tema apresentado para a realização desta pesquisa, inferências foram realizadas sobre as relações entre as áreas de vulnerabilidade, dadas pelos nós do SD, e as áreas afetadas, dadas pelas diversas faltas aplicadas nos mesmos. Áreas estas relacionadas com as linhas e colunas da matriz utilizada como entrada do algoritmo de otimização, seja a MTC ou MGC. Sendo assim, caso seja possível encontrar locais com áreas de vulnerabilidade que contemplem o monitoramento dos afundamentos em todos os nós do sistema, a instalação de monitores nesses pontos pode ser considerada como uma resposta de alocação válida. O problema resultante então, está na identificação de um procedimento para que esta escolha seja feita de tal modo que sua resposta de alocação seja próxima da ótima.

Afim de exemplificar o processo, a Tabela 4.7 ilustra a MGC para um limiar de 0,7 a 0,9 p.u. do sistema teste de 34 nós, expressa em sua forma gráfica. Porém, antes de discorrer sobre a mesma, cabe ressaltar um detalhe sobre a quantidade de linhas da matriz. Percebe-se que esta é composta por 31 linhas apesar do sistema ser descrito por 34 nós. Isso se dá pelo fato de que um dos nós considerado no modelo original está a montante do transformador da subestação, portanto, não será considerado como opção de alocação de monitores. Os outros dois nós restantes se referem a pontos do sistema de baixa tensão que também não podem ser considerados como opção de instalação, conforme a ideologia adota nesta pesquisa.

A matriz apresentada teve seu limiar diminuído, e, conseqüentemente, sua área afetada reduzida, uma vez que um limiar mais baixo é adotado. Apesar da facilidade de aplicação do método simplificado para o presente sistema, estudos sobre suas limitações não foram realizados, uma vez que foi possível utilizá-lo mesmo no sistema com maior números de nós considerado nesta pesquisa (128 nós).

No sentido de auxiliar a aplicação do método e entendimento da análise, o primeiro passo a ser tomado tem objetivo de estudar as áreas de vulnerabilidade e afetadas dos nós do sistema. Assim, após a construção da MGC, fazem-se os somatórios individuais de todas as suas linhas, representadas na última coluna da Tabela 4.7, e de todas suas colunas individuais, representadas na parte inferior da mesma tabela.

Tabela 4.7 – MGC do sistema teste de 34 nós com um limiar de tensão de 0,7 a 0,9 p.u.

	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	S	
1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	
2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
3	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	
4	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
5	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	
6	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
7	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	25	
8	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	4
9	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	18	
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	13	
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	10	
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	8	
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	
25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	6	
26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	3	
27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	
28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	3	
29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	2	
30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	
31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	
	1	2	1	2	1	2	1	2	3	4	3	2	2	2	3	4	4	3	4	5	4	5	5	6	6	7	8	7	8	9	5		

Feito isso, os indicativos são os seguintes:

1. Realizar instalações obrigatórias

Nós referentes às colunas com somatório igual a 1, devem ser, obrigatoriamente, escolhidos como ponto de instalação dos monitores. Afinal, nenhum

outro nó tem a possibilidade de monitorá-lo e a resposta do método tem como restrição a observação de todos afundamentos presentes no SD.

2. Excluir as colunas que tiverem monitoramento garantido

Uma vez que as alocações obrigatórias foram feitas, deve-se então analisar as linhas referentes desses pontos, identificar quais nós eles conseguem monitorar e excluir suas colunas, ou seja, uma vez que um ponto de alocação monitora, por exemplo, os dez primeiros nós do sistema, eles deverão ser retirados da análise por já ter monitoramento garantido quando o método simplificado for adotado. Por exemplo, observando o somatório dos elementos das colunas dos nós #1 e #3, é possível observar que estes são nós de alocação obrigatória (somatório igual a 1). Quando suas linhas são analisadas, percebe-se que o monitor instalado no nó #1 consegue monitorar tanto sua própria localização, quanto o nó #2. A mesma situação acontece com o nó #3, que consegue monitorar sua localização e a do nó #4.

Assim, sabendo que os nós de alocação obrigatória são os de número #1, #3, #5 e #7, e alocando os monitores nestas posições, é possível notar que todos os nós já serão monitorados. Este esquema de alocação então, pode ser apresentado como uma resposta ao problema, que por sinal é igual à resposta dada pelo algoritmo genético para a mesma configuração de MGC.

Em função da topologia e alta tensão de regime permanente, a garantia do monitoramento de todos os nós foi realizada com facilidade para o sistema de 34 nós. No entanto, em caráter didático, para explicar melhor sobre o método simplificado, pode-se supor uma situação que o nó #7 conseguiria somente monitorar até o nó #15, ou seja, os números 1's (um) da linha 7 seguiriam da coluna 7 até a coluna 15. A Tabela 4.8 exemplifica o passo 2 do método aplicado quando da ocorrência desta situação.

3. Escolha dos próximos locais de instalação

No caso hipotético apresentado, o próximo local de instalação dos monitores será dado pelas linhas da matriz, o ponto que tiver o maior peso associado número do resultado do somatório dos elementos das suas linhas, será escolhido. Garantindo assim, que o próximo monitor cobrirá a maior quantidade de nós restantes. No cenário apresentado, o ponto seguinte de instalação dos monitores é dado pelo nó #13, uma vez observada os 18 nós seguintes.

Tabela 4.8 – Parte da MGC resultante da aplicação do passo 2 do método simplificado.

	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	S
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	4
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
13	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	18
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
15	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3
16	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
17	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
18	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	13
19	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
20	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
21	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	10
22	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
23	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	8
24	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1
25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	6
26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	3
27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	3
29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	2
30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
	4	4	3	4	5	4	5	5	6	6	7	8	7	8	9	5	

Nesse caso, somente um monitor além dos obrigatórios resolveu o problema de monitoramento dos nós restantes. Mas caso uma resposta de solução ainda não seja definida, os passos 2 e 3 devem ser repetidos até que todos os pontos do sistema tenham monitoramento garantido.

Dito isso, percebe-se que o método simplificado, na verdade, tenta reduzir por eliminação, possíveis pontos de instalação no sistema. Reduzindo,

consequentemente, o espaço de busca para boas respostas para a alocação de MQEE.

Este método simplificado foi aplicado paralelamente ao algoritmo de otimização implementado via AG e os resultados e comparações das duas respostas serão apresentados e discutidos posteriormente.

4.8 Considerações Finais

Como pode ser observado, a metodologia apresentada se utiliza de conceitos apresentados em recentes trabalhos técnicos-científicos para sugerir novos meios de tratamento dos dados de entrada e maneiras próprias ao lidar com o processo de encontro de uma resposta para o esquema de alocação de MQEE em SDs.

Apesar de uma validação do esquema de alocação ser efetuada ao fim do processo inferindo sobre a eficiência do sistema de monitoramento, testes, adequações e questionamentos ainda precisam ser efetuados e melhor analisados sobre os passos adotados em cada etapa. Tais procedimentos serão descritos com mais atenção ao final do trabalho, no capítulo destinado aos trabalhos futuros relacionados à pesquisa.

5 Sistemas Elétricos Analisados

Com o intuito de testar e validar as metodologias propostas, quatro sistemas elétricos serão utilizados. Os três primeiros a serem descritos, são apresentados pelo IEEE, modelados pelo subcomitê de alimentadores teste de sistemas de distribuição (PES, 2000-2010) e descritos como sistemas teste de 13, 34 e 123 nós. Além destes três sistemas, um sistema de distribuição real de uma concessionária de energia regional também foi modelado e utilizado como meio de aplicação da metodologia proposta. O alimentador está contido em um cenário de cargas industriais e foi avaliado como uma boa opção para avaliar as duas abordagens por um cenário mais próximo do real brasileiro.

Os alimentadores são de diferentes ordens e com características principais distintas. As mesmas serão descritas e suas modelagens exemplificadas nos itens que seguem.

5.1 Modelagem dos componentes

Este item tem como objetivo descrever como os componentes dos sistemas testes de distribuição foram modelados, suas principais características e *softwares* utilizados.

5.1.1 ATP e ATPDraw

Após a aquisição das informações técnicas do sistema elétrico a ser estudado, sobre o qual a metodologia de alocação dos monitores será aplicada, o subsequente passo está associado à modelagem computacional do mesmo. Para isso, no desenvolvimento deste trabalho, o *software Alternative Transients Program* (ATP) (Kizilcay, 2015) foi utilizado via a interface gráfica do programa ATPDraw (Høidalen, 2012). A partir destes dois *softwares*, a modelagem gráfica e matemática do SEP se tornam imediatas, as análises tanto em regime permanente quanto de eventos transitórios são possíveis e acessíveis.

O ATP é um programa universal para simulação digital tanto de fenômenos transitórios eletromagnéticos, assim como os de natureza eletromecânica. A partir dele, sistemas elétricos complexos e de controle de estrutura arbitrária podem ser simulados. O ATP tem capacidades extensivas de modelagem e importantes características adicionais além das simulações de transitórios.

O ATPDraw é um *software* gráfico, pré-processador para a versão do programa ATP via plataforma MS-Windows. No programa, o usuário pode modelar circuitos elétricos através da seleção de componentes da biblioteca, em que posteriormente, como produto da simulação, um arquivo de entrada para o ATP é gerado pelo *software*. Os processos se tornam ainda mais descomplicados com a possibilidade de integração ao programa da simulação feita no ATP e programas de impressão de gráficos.

5.1.2 Cargas

As cargas dos sistemas testes do IEEE podem ser conectadas a um nó (cargas concentradas) ou consideradas uniformemente distribuídas ao longo da seção da linha (cargas distribuídas). Estas também poderão ser trifásicas (balanceadas e desbalanceadas), sendo conectadas em estrela, delta ou monofásicas. Pelas características das cargas disponibilizadas nos sistemas de distribuição do IEEE, todas serão modeladas como de impedância constante via o software ATP.

As cargas do sistema teste real foram modeladas através de um método de aproximação de acordo com as potências nominais dos transformadores instalados ao longo do alimentador.

5.1.3 Banco de capacitores

Bancos de capacitores *shunt*, ou em derivação, podem ser trifásicos conectados em delta, estrela ou monofásicos. Estes foram modelados considerando susceptâncias constantes e especificadas em kVAr.

5.1.4 Modelos de linhas

A Figura 5.1 mostra os espaçamentos entre os condutores de fase e o condutor neutro, especificados em metros, utilizados na modelagem das linhas aéreas dos sistemas exemplos dos alimentadores teste do IEEE. Quando citados posteriormente, os espaçamentos serão referenciados como 1, 2 e 3.

*Figura 5.1 – Espaçamento das linhas aéreas.
Adaptado: Original Test Feeder Paper – IEEE.*

Os espaçamentos entre os cabos das linhas subterrâneas trifásicas e bifásicas são ilustrados na Figura 5.2. Estes podem ser encontrados nos SDs de 13 e 123 nós, que serão posteriormente apresentados. Quando referenciados, os espaçamentos serão ditos como 4 e 5.

*Figura 5.2 – Espaçamento das linhas subterrâneas trifásicas e bifásicas.
Fonte: Original Test Feeder Paper – IEEE.*

A Tabela 5.1 lista as características das configurações de vários condutores utilizados na modelagem das linhas aéreas. Nesta tabela, AA, ACSR e CU representam condutores do tipo alumínio, alumínio reforçado com cobre e de cobre, respectivamente.

Tabela 5.1 – Dados dos condutores utilizados para caracterizar as linhas aéreas.

Tamanho do condutor (AWG/kcmil)	Tipo do condutor	Resistência 60 Hz/50 °C (ohms/milha)	Diâmetro do condutor (polegadas)	Raio Médio Geométrico (ft.)	Ampacidade a 50 °C (amp)
1,000	AA	0,105	1,15	0,0368	698
556,5	ACSR	0,1859	0,927	0,0313	730
500	AA	0,206	0,813	0,026	483
336,4	ACSR	0,306	0,721	0,0244	530
250	AA	0,410	0,567	0,0171	329
# 4/0	ACSR	0,592	0,563	0,00814	340
# 2/0	AA	0,769	0,414	0,0125	230
# 1/0	ACSR	1,12	0,398	0,00446	230
# 1/0	AA	0,970	0,368	0,0111	310
# 2	AA	1,54	0,292	0,00883	156
# 2	ACSR	1,69	0,316	0,00418	180
# 4	ACSR	2,55	0,257	0,00452	140
# 10	CU	5,903	0,102	0,00331	80
# 12	CU	9,375	0,081	0,00262	75
# 14	CU	14,872	0,064	0,00208	20

Adaptado: Original Test Feeder Paper – IEEE.

As características dos vários cabos de neutros concêntricos usados nos sistemas testes são apresentadas na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Cabos concêntricos de neutro, 15 kV, alumínio (AA).

Tamanho do condutor (AWG/kcmil)	Diâmetro sobre isolamento (polegadas)	Diâmetro sobre a tela (polegadas)	Diâmetro externo total (polegadas)	Cobre 1/3 neutro (No. x AWG)	Ampacidade em um duto de 4 polegadas
2(7x)	0,78	0,85	0,98	6 x 14	135
1/0(19x)	0,85	0,93	1,06	6 x 14	175
2/0(19x)	0,90	0,97	1,10	7 x 14	200
250(37x)	1,06	1,16	1,29	13 x 14	260
500(37x)	1,29	1,39	1,56	16 x 12	385
1000(61x)	1,64	1,77	1,98	20 x 10	550

Adaptado: Original Test Feeder Paper – IEEE.

A Tabela 5.3 lista as características do condutor blindado usado nos sistemas testes.

Tabela 5.3 – Cabo blindado, 15 kV, alumínio (AA).

Tamanho do condutor (AWG)	Diâmetro sobre isolamento (polegadas)	Diâmetro sobre a blindagem (polegadas)	Espessura da proteção (mils)	Diâmetro total (polegadas)	Ampacidade em um duto de 4 polegadas
1/0	0,82	0,88	80	1,06	165

Adaptado: Original Test Feeder Paper – IEEE

Cada segmento de linha entre os nós dos sistemas utilizados faz uso de uma configuração com os condutores mostrados. Estas serão descritas posteriormente nos itens referentes aos sistemas.

As configurações criadas pelos dados apresentados serão transpostas em uma matriz impedância, a qual é responsável por representar as impedâncias próprias e mútuas das linhas, e também utilizada como entrada do circuito PI equivalente no software ATP.

Os dados das impedâncias características das linhas de distribuição do sistema real foram retirados de tabelas cedidas pela concessionária responsável. O comprimento dos trechos (linhas de distribuição), disposição das fases e tipos de rede também são informados neste documento.

5.1.5 Reguladores de tensão

Em sistemas de grandes distâncias observa-se a dificuldade em manter o perfil das tensões dentre dos limites aceitáveis. Neste cenário, os reguladores de tensão fazem o papel de aumentar ou diminuir a tensão no ponto instalado para estabilizar as tensões a um valor aceitável, próximo ou nominal (regulamentado).

Nos sistemas exemplos, a presença desses equipamentos será modelada através de transformadores monofásicos ideais, sendo cada um destes instalados em uma fase no sistema, ajustando assim, a tensão para um nível apropriado para a topologia do sistema.

5.1.6 Transformadores

Os transformadores das subestações e os abaixadores instalados a montante no sistema de distribuição serão modelados através dos dados obtidos no relatório técnico de cada sistema. Este contém as especificações apontando a potência nominal do transformador, tensões nominais no primário e secundário, resistência e reatância em p.u., dentre outras informações.

Dados os parâmetros considerados para a modelagem dos sistemas elétricos, cabe um comentário, de caráter informativo, sobre a potência de curto-circuito considerada para os mesmos. Nos modelos retratados pelo IEEE, não existem informações sobre esta potência em suas subestações. Sendo assim, a mesma será limitada pela impedância do transformador, dado fornecido em porcentagem tanto para os sistemas testes quanto para o real, o qual também não será modelado através de uma potência de curto-circuito específica.

5.2 Sistema de 13 nós

O sistema de 13 nós do IEEE apesar de pequeno contém características interessantes, denotadas por ser:

- Curto e com carregamento relativamente alto para um alimentador de 4,16 kV (~4 MVA);
- Linhas aéreas e subterrâneas com alta variedade de fases;
- Banco de capacitor *shunt*;
- Transformador abaixador em série; e
- Cargas desbalanceadas e distribuídas.

Apesar de relativamente pequeno, este alimentador pode prover um conjunto interessante de situações operacionais para a maioria das características de análise de sistemas de distribuição.

A Figura 5.3 ilustra o diagrama unifilar do sistema de 13 nós, no qual é possível observar o regulador de tensão logo na saída da subestação, um

transformador abaixador entre os nós #633 e #634, e uma chave entre os nós #671 e #692.

*Figura 5.3 – Diagrama unifilar do sistema de 13 nós
Fonte: 13- node test feeder – IEEE.*

Para uma melhor exemplificação dos dados do sistema utilizados na modelagem realizada, neste documento, serão descritos, de maneira detalhada, somente os referentes ao sistema de 13 nós. Os dados a serem comentados referem-se aos condutores em cada configuração das linhas, à configuração dos seus segmentos, à especificação das cargas, aos capacitores e aos transformadores. Para os outros sistemas, de 34 e 123 nós, as informações e dados considerados são similares e não serão apresentados em função de seus extensivos detalhamentos. Contudo, estes dados podem ser encontrados em PES (2000-2010).

5.2.1 Dados das linhas

A Tabela 5.4 descreve as configurações das linhas utilizadas no sistema de 13 nós com seus respectivos condutores.

Tabela 5.4 – Configurações das linhas do sistema de 13 nós.

Config.	Fases	Condutor (ACSR)	Neutro	Espaçamento
1	A B C N	250,000 AA, CN	Nenhum	4
2	A N	1/0 AA, TS	1/0 Cu	5
3	B A C N	556,500 26/7	4/0 6/1 ACSR	1
4	C A B N	4/0 6/1	4/0 6/1 ACSR	1
5	C B N	1/0	1/0 ACSR	2
6	A C N	1/0	1/0 ACSR	2
7	C N	1/0	1/0 ACSR	3

Adaptado: 13-node test feeder - IEEE

Tabela 5.5 – Dados dos segmentos das linhas.

Nó A	Nó B	Comprimento (m)	Configuração
632	645	152,4	5
632	633	152,4	4
633	634	0	Trafo
645	646	91,44	5
650	632	609,6	3
684	652	243,84	2
632	671	609,6	3
671	684	300	6
671	680	91,44	3
671	692	0	Chave
684	611	91,44	2
692	675	152,4	1

5.2.2 Dados dos capacitores

A Tabela 5.6 ilustra os dados dos bancos de capacitores utilizados no sistema de 13 nós, especificados em kVAr.

Tabela 5.6 – Dados dos bancos de capacitores do sistema de 13 nós..

Nó	Fase A	Fase B	Fase C
675	200	200	200
611			100
Total	200	200	300

5.2.3 Dados das cargas

As Tabelas 5.7 e 5.8 descrevem as cargas concentradas e distribuídas, respectivamente, do sistema de 13 nós.

Tabela 5.7 – Dados das cargas concentradas.

Nó	Modelo	Fase A (kW)	Fase A (kVAr)	Fase B (kW)	Fase B (kVAr)	Fase C (kW)	Fase C (kVAr)
634	Y	160	110	120	90	120	90
645	Y	0	0	170	125	0	0
646	D	0	0	230	132	0	0
652	Y	128	86	0	0	0	0
671	D	385	220	385	220	385	220
675	Y	485	190	68	60	290	212
692	D	0	0	0	0	170	151
611	Y	0	0	0	0	170	80
	Total	1158	606	973	627	1135	753

Adaptado: 13-node test feeder – IEEE.

Tabela 5.8 – Dados da cargas distribuídas.

Nó A	Nó B	Modelo	Fase A (kW)	Fase A (kVAr)	Fase B (kW)	Fase B (kVAr)	Fase C (kW)	Fase C (kVAr)
632	671	Y	17	10	66	38	117	68

Adaptado: 13-node test feeder – IEEE.

A Figura 5.4 apresenta o diagrama do sistema de 13 nós após a consideração de todos os dados apresentados e que foram repassados como entradas para o ATP, via a interface gráfica do *software* ATPDraw.

Figura 5.4 – Sistema de 13 nós modelado via a interface do software ATPDraw.

5.3 Sistema de 34 nós

Como descrito anteriormente, o detalhamento dos próximos sistemas serão feitas de maneira mais simplificada, direta e com ciência de que a modelagem das linhas e trechos é similar ao sistema de 13 nós. A maior preocupação será ilustrar a topologia e principais características dos outros cenários, em razão de que, na apresentação dos resultados, os sistemas utilizados serão ilustrados através de uma representação que considera a distância real, em escala, entre os nós.

O sistema de 34 nós do IEEE, já citado algumas vezes no decorrer deste trabalho, é baseado em um alimentador real localizado no estado de Arizona, nos Estados Unidos. Sua tensão nominal é de 24,9 kV, e suas principais características são:

- Muito longo e levemente carregado (o comprimento do nó mais distante do tronco principal chega a 57,6 km com 2,05 MVA de carregamento);
- Dois reguladores de tensão requeridos para manter um bom perfil de tensão;
- Um transformador abaixador para 4,16 kV, situado entre os nós #832 e #888.
- Cargas desbalanceadas concentradas e distribuídas; e
- Banco de capacitores *shunt*.

A Figura 5.5 ilustra o diagrama unifilar do sistema de 34 nós.

Figura 5.5 – Diagrama unifilar do sistema de 34 nós.
Fonte: 34-node test feeder – IEEE.

Por ser muito extenso, o sistema de 34 nós necessita da instalação de dois reguladores de tensão em série no alimentador principal. A distância entre o nó de referência (#800) ao primeiro e o segundo regulador de tensão é de 31,6 e 54,7 km, respectivamente. Bancos de capacitores foram instalados nos nós #844 e #848, sendo ambos trifásicos e com potência nominal de 300 kVAr e 450 kVAr, respectivamente.

Contudo, por ser levemente carregado, a subestação conta apenas com um transformador abaixador de 2,5 MVA com tensão primária de 69 kV e secundária de 24,9 kV (tensão nominal do sistema). O alimentador também contempla um grande número de cargas distribuídas, as quais são aproximadamente em mesma quantidade

quanto às cargas fixas. No tocante a sua modelagem, as cargas foram representadas por uma aproximação como sendo uma carga concentrada no meio de cada trecho das linhas de distribuição. Tal aproximação é sugerida também pelo relatório que descreve as características gerais dos sistemas estudados pelo IEEE.

A Figura 5.6 ilustra o sistema de 34 nós modelado via a interface do *software* ATPDraw com suas características e componentes devidamente modelados.

Figura 5.6 – Sistema de 34 nós modelado via a interface do software ATPDraw.

A Tabela 5.9 descreve os segmentos das linhas do sistema com seus comprimentos, em metros, e a configuração de fases de cada parte.

Tabela 5.9 – Segmentos das linhas do sistema de 34 nós.

Nó A	Nó B	Comprimento (m)	Fases
800	802	784	Trifásico
802	806	526	Trifásico
806	808	9798	Trifásico
808	810	1764	Mono - B
808	812	11400	Trifásico
812	814	9038	Trifásico
814	850	3	Trifásico
816	818	520	Mono - A
816	824	3104	Trifásico
818	820	14638	Mono - A
820	822	4177	Mono - A
824	826	921	Mono - B
824	828	255	Trifásico
828	830	6214	Trifásico
830	854	158	Trifásico
832	858	1490	Trifásico
832	888	0	Trafo
834	860	614	Trifásico
834	842	85	Trifásico
836	840	261	Trifásico
836	862	85	Trifásico
842	844	410	Trifásico
844	846	1107	Trifásico
846	848	161	Trifásico
850	816	94	Trifásico
852	832	3	Trifásico
854	856	7092	Mono - B
854	852	11196	Trifásico
858	864	492	Mono - A
858	834	1772	Trifásico
860	836	815	Trifásico
862	838	1477	Mono - B
888	890	3210	Trifásico

Adaptado: 34- node test feeder - IEEE

5.4 Sistema de 123 nós

O sistema de distribuição teste do IEEE de 123 nós opera a uma tensão nominal de 4,16 kV. Em função do nível de tensão, o SD contém problemas de queda de tensão que devem ser resolvidos com a aplicação de reguladores de tensão e bancos de capacitores. Suas principais características são:

- Segmentos de linhas aéreas e subterrâneas com diferenciação entre as fases;
- Cargas desbalanceadas;
- Todas as cargas são do tipo concentrada;
- Quatro reguladores de tensão ao longo do sistema;
- Banco de capacitores *shunt*; e
- Chaves que tornam possíveis caminhos alternativos de fluxo de potência.

A Figura 5.7 ilustra o diagrama unifilar do sistema teste de 123 nós.

Figura 5.7 – Diagrama unifilar do sistema de 123 barras.
Fonte: 123- node test feeder.

O sistema tem um carregamento total de 3,8 MVA, sendo atendido por um transformador na subestação de 5 MVA, com a tensão de 115 kV em seu primário, e 4,16 kV no secundário. Um transformador abaixador está alocado no nó #61 com potência nominal de 150 kVA, reduzindo a tensão para 480 V.

Bancos de capacitores foram instalados nos nós #83 (trifásico 600 kVAr), #88 (monofásico – fase A – 50 kVAr), #90 (monofásico – fase B – 50 kVAr) e #92 (monofásico – fase C - 50 kVAr).

O sistema também conta com dez chaves trifásicas, as quais podem ser utilizadas para criação de caminhos para um fluxo alternativo de potência.

A Figura 5.7 ilustra o sistema de 123 nós modelado via a interface do *software* ATPDraw.

Figura 5.8 - Sistema de 123 nós modelado via a interface do *software* ATPDraw.

A Tabela 5.10 descreve os segmentos das linhas do sistema com seus comprimentos, em metros, e a configuração das fases de cada parte.

Tabela 5.10 - Segmentos das linhas do sistema de 123 nós.

Node A	Node B	Comprimento (m)	Configuração	Node A	Node B	Comprimento (m)	Configuração
1	2	53,2	Aéreo - 1F - B	60	61	0,608	Aéreo - 3F
1	3	76	Aéreo - 1F - C	60	62	0,912	Sub - 3F
1	7	91,2	Aéreo - 3F	62	63	2,128	Sub - 3F
3	4	60,8	Aéreo - 1F - C	63	64	1,216	Sub - 3F
3	5	98,8	Aéreo - 1F - C	64	65	1,52	Sub - 3F
5	6	76	Aéreo - 1F - C	65	66	1,824	Sub - 3F
7	8	60,8	Aéreo - 3F	67	68	2,432	Aéreo - 1F - A
8	12	68,4	Aéreo - 1F - B	67	72	3,648	Aéreo - 3F
8	9	68,4	Aéreo - 1F - A	67	97	2,736	Aéreo - 3F
8	13	91,2	Aéreo - 3F	68	69	3,952	Aéreo - 1F - A
9	14	129,2	Aéreo - 1F - A	69	70	4,256	Aéreo - 1F - A
13	34	45,6	Aéreo - 1F - C	70	71	10,336	Aéreo - 1F - A
13	18	250,8	Aéreo - 3F	72	73	5,472	Aéreo - 1F - C
14	11	76	Aéreo - 1F - A	72	76	3,344	Aéreo - 3F
14	10	76	Aéreo - 1F - A	73	74	3,04	Aéreo - 1F - C
15	16	114	Aéreo - 1F - C	74	75	4,864	Aéreo - 1F - C
15	17	106,4	Aéreo - 1F - C	76	77	5,168	Aéreo - 3F
18	19	76	Aéreo - 1F - A	76	86	5,776	Aéreo - 3F
18	21	91,2	Aéreo - 3F	77	78	6,384	Aéreo - 3F
19	20	98,8	Aéreo - 1F - A	78	79	6,08	Aéreo - 3F
21	22	159,6	Aéreo - 1F - B	78	80	6,688	Aéreo - 3F
21	23	76	Aéreo - 3F	80	81	6,992	Aéreo - 3F
23	24	167,2	Aéreo - 1F - C	81	82	7,296	Aéreo - 3F
23	25	83,6	Aéreo - 3F	81	84	7,6	Aéreo - 1F - C
25	26	106,4	Aéreo - 2F - A-C	82	83	7,904	Aéreo - 3F
25	28	60,8	Aéreo - 3F	84	85	8,512	Aéreo - 1F - C
26	27	83,6	Aéreo - 2F - A-C	86	87	8,208	Aéreo - 3F
26	31	68,4	Aéreo - 1F - C	87	88	9,424	Aéreo - 1F - A
27	33	152	Aéreo - 1F - A	87	89	10,032	Aéreo - 3F
28	29	91,2	Aéreo - 3F	89	90	8,816	Aéreo - 1F - B
29	30	106,4	Aéreo - 3F	89	91	9,12	Aéreo - 3F
30	250	60,8	Aéreo - 3F	91	92	76	Aéreo - 1F - C
31	32	91,2	Aéreo - 1F - C	91	93	9,728	Aéreo - 3F
34	15	30,4	Aéreo - 1F - C	93	94	4,56	Aéreo - 1F - A
35	36	197,6	Aéreo - 2F - A-B	93	95	10,944	Aéreo - 3F
35	40	76	Aéreo - 3F	95	96	12,16	Aéreo - 1F - B
36	37	91,2	Aéreo - 1F - A	97	98	11,248	Aéreo - 3F
36	38	76	Aéreo - 1F - B	98	99	11,552	Aéreo - 3F
38	39	98,8	Aéreo - 1F - B	99	100	11,856	Aéreo - 3F
40	41	98,8	Aéreo - 1F - C	100	450	12,464	Aéreo - 3F
40	42	76	Aéreo - 3F	101	102	12,768	Aéreo - 1F - C
42	43	152	Aéreo - 1F - B	101	105	13,072	Aéreo - 3F
42	44	60,8	Aéreo - 3F	102	103	13,376	Aéreo - 1F - C
44	45	60,8	Aéreo - 1F - A	103	104	13,68	Aéreo - 1F - C
44	47	76	Aéreo - 3F	105	106	14,288	Aéreo - 1F - B
45	46	91,2	Aéreo - 1F - A	105	108	13,984	Aéreo - 3F
47	48	45,6	Aéreo - 3F	106	107	14,592	Aéreo - 1F - B
47	49	76	Aéreo - 3F	108	109	14,896	Aéreo - 1F - A
49	50	76	Aéreo - 3F	108	300	15,2	Aéreo - 3F
50	51	76	Aéreo - 3F	109	110	15,504	Aéreo - 1F - A
51	151	152	Aéreo - 3F	110	111	45,904	Aéreo - 1F - A
52	53	60,8	Aéreo - 3F	110	112	16,112	Aéreo - 1F - A
53	54	38	Aéreo - 3F	112	113	16,416	Aéreo - 1F - A
54	55	83,6	Aéreo - 3F	113	114	16,72	Aéreo - 1F - A
54	57	106,4	Aéreo - 3F	135	35	17,328	Aéreo - 3F
55	56	83,6	Aéreo - 3F	149	1	17,024	Aéreo - 3F
57	58	76	Aéreo - 1F - B	152	52	17,632	Aéreo - 3F
57	60	228	Aéreo - 3F	160	67	18,24	Aéreo - 3F
58	59	76	Aéreo - 1F - B	197	101	17,936	Aéreo - 3F

Adaptado: 123- node test feeder

Figura 5.10 – SD real modelado via a interface do software ATPDraw.

Até então, apesar das representações adequadas das topologias dos SDs em análise, nenhuma das figuras apresentadas ilustram as distâncias físicas, em escala, entre os nós. Neste sentido, quando da apresentação dos resultados da pesquisa, as localizações dos MQEEs aparecerão em uma representação do SD com seus comprimentos em escala. O principal motivo para tal está relacionado com o fato de que, quando somente a numeração dos pontos de instalação é observada, pode parecer que os monitores serão alocados muito próximos um dos outros. No entanto, quando posicionados em um esquema representativo ao seu comprimento, poderá observado um espaçamento “proporcional” entre os equipamentos. Tal espaçamento poderá ser melhor explorado em aplicações futuras, como, por exemplo, a localização de faltas, a partir da alocação otimizada realizada.

6 Resultados

Dada as metodologias propostas, o presente capítulo se destina a apresentar e discutir as respostas encontradas para a alocação de MQEEs sobre os quatros SDs. Os resultados serão apresentados em uma ordem diferente da utilizada no capítulo referente aos sistemas elétricos porque entende-se que a compreensão da metodologia e respostas será facilitada deste modo. Sendo assim, os esquemas de alocação apresentados respeitarão a seguinte ordem: SD de 34 nós, seguido pelos SDs de 13 e 123 nós, e, posteriormente, pelo SD brasileiro real.

6.1 Sistema de Distribuição de 34 nós

6.1.1 Alocação dos MQEEs via AG

Como exemplificado no capítulo referente à metodologia, item 4.3, e, processo empregado sobre todos os SDs, o primeiro passo foi a aplicação de curtos-circuitos de todos os tipos em alguns nós do alimentador para a descoberta da classificação da falta de menor severidade (aquela que venha a propagar afundamentos de tensão com menor intensidade).

Nove nós distintos (bem espaçados) foram, então, escolhidos para a aplicação dos diversos curtos-circuitos possíveis sobre o SD de 34 nós, seguidos por uma análise sobre suas tensões residuais em cada cenário. Desse modo, o tipo de falta escolhido para a execução do método de otimização foi do caráter monofásico-terra, referente a fase *B*, com máxima resistência de falta possível (item 4.3).

Como a tensão nominal do sistema estudado é relativamente alta (24,9 kV), a resistência de falta utilizada foi a máxima possível a ser considerada, 50 Ω , exceto para os nós #1 e #2, os quais não apresentaram afundamentos de tensão para essa resistência. Para esses dois nós, o valor escolhido para a aplicação dos curtos-circuitos foi de 40 Ω .

Posteriormente a escolha dos parâmetros de faltas, os curtos-circuitos aplicados e as tensões residuais em todos os nós foram utilizados para a confecção da MTDF do sistema. Assim, se tornou possível a construção de uma MTC com a sugestão dada no presente documento (restrição topológica). A Tabela 6.1 ilustra a MTC do sistema de 34 nós, para a doção de um limiar de tensão de 0,9 p.u.

Tabela 6.1 – MTC do sistema de 34 nós com um limiar de 0,9 p.u.

[illegible]

Vale ressaltar que apesar do sistema ter 34 nós, dois deles são referentes a nós da rede secundária de baixa tensão e não entrarão na análise. O mesmo acontece para um nó de referência do primário da subestação. Portanto, a alocação será feita para os 31 nós restantes.

Dada a formatação dos dados de entrada, o AG implementado foi aplicado considerando a MTC apresentada, e, após a adaptação de várias gerações de populações à função objetivo, a alocação dos monitores dado é expresso na Tabela 6.2 e ilustrado através da Figura 6.1, com a distância entre os nós em escala representativa.

Tabela 6.2 – Esquema de alocação para o sistema de 34 nós com um limiar de 0,9 p.u.

<i>Nº de monitores</i>	<i>Nós de instalação</i>
3	#1, #3 e #7

Figura 6.1 – Alocação dos MQEES no sistema de 34 nós.

Na Figura 6.1 apresentada, os ramos do sistema assumem cores diferentes. A razão disso é pelo fato de que nem todos os ramos do alimentador são trifásicos. Sendo assim, os ramos monofásicos referentes à fase A, por exemplo, são

representados em verde. Já os referentes à fase *B* em azul, e os trifásicos em preto. É importante ressaltar que o tipo de falta escolhido para estruturar a MTDF foi o tipo monofásico referente à fase *B*. Porém, percebe-se que nem todos os nós contemplam a fase adotada. Portanto, para os nós que somente contemplam a fase *A*, faltas do tipo monofásicas referente à fase *A* foram simuladas.

Outra observação a ser notada é que, pela restrição sugerida pelo trabalho, os nós em análise podem ser monitorados somente por pontos a montante na topologia do alimentador. Sendo assim, para a garantia da observação de todos os nós por pelo menos um monitor, o primeiro nó do sistema a ser considerado na alocação sempre terá um monitor instalado por padrão.

Dado o esquema de alocação, os artifícios citados na descrição da metodologia do presente trabalho podem ser utilizados no sistema para a obtenção de diferentes respostas para o esquema de monitoramento. Como a quantidade de monitores foi relativamente pequena, o conceito da MGC pode ser aplicado. A Tabela 4.7, apresentada no item referente à explicação do método simplificado, é uma MGC construída por limiares de 0,9 a 0,7 p.u.. Quando aplicado, o artifício diminui a área afetada pelas faltas adotadas, aumentando o requisição do sistema de monitoramento para observar todos os afundamentos. Após a sua atualização como dado de entrada do AG utilizado no trabalho, a resposta para alocação pode ser dada pela Tabela 6.3 e ilustrada na Figura 6.2. O resultado disso foi a ocorrência de uma alteração no número de monitores no esquema de alocação, adicionando um equipamento ao nó #5.

No tocante ao limiar de tensão de 0,8 p.u., a sua análise não será apresentada, pois quando construída a MGC referente a essa situação, a mesma não apresentou nenhuma modificação para a alocação dos monitores.

Tabela 6.3 - Esquema de alocação para o sistema de 34 nós com limiares de 0,9 p.u. a 0,7 p.u.

<i>Nº de monitores</i>	<i>Nós de instalação</i>
4	#1, #3, #5 e #7

Figura 6.2 - Ilustração do esquema de alocação dos MQEEs no sistema de 34 nós dada a MGC de 0,9-0,7 p.u.

A presente pesquisa efetuou análises para os limiares de até 0,5 p.u., sempre apresentando mudanças quando observadas. Desse modo, caso o usuário tenha a intenção de descobrir novas localizações para a instalação de um número ainda maior de monitores, o artifício pode continuar sendo utilizado. O próximo esquema será referente a uma MGC com limiares de tensão entre 0,9 e 0,6 p.u.. A Tabela 6.4 ilustra a matriz de cobertura, e a Tabela 6.5 expõe os pontos de instalação. A distribuição dos monitores no alimentador é representada pela Figura 6.3.

Tabela 6.4 - MGC do sistema de 34 nós com limiares entre 0,9 e 0,6 p.u.

	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	
1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
3	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
4	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
5	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
6	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	
7	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
8	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
9	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	1	1	1	1	
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	0	1	1	0	
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	
24	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	
25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	
26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	
27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	
28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	1	1	1	1	
29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0
30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Tabela 6.5 - Alocação de MQEEs para o sistema de 34 nós com limiares entre 0,9 p.u. e 0,6 p.u.

Nº do monitores	Nós de instalação
6	#1, #3, #5, #6, #9 e #14

Tabela 6.6 - MGC do sistema de 34 nós para limiares entre 0,9 e 0,5 p.u.

	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	0	1	1	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1
26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	1	1	1	1
29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0
30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Tabela 6.7 - Alocação para o sistema de 34 nós com limiares entre 0,9 p.u. e 0,5 p.u.

Nº de monitores	Nós de instalação
8	#1, #3, #5, #6, #9, #14, #15 e #27

Figura 6.4 - A alocação dos MQEEs no sistema de 34 nós dada para a MGC com limiares entre 0,9-0,5 p.u.

6.1.2 Alocação dos MQEEs via o Método Simplificado

No tocante ao uso do método simplificado, quando aplicado para todas as situações descritas anteriormente (com MGCs com diversos limiares), o mesmo produziu respostas idênticas às dadas pelo AG. Neste sentido, para que este item não se exceda demasiadamente, apenas o uso do método simplificado para o menor limiar será discutido. No entanto, caso se deseje obter a resposta pelo método descrito para as outras situações, uma aplicação direta e simplificada de seus passos explicados no Capítulo 4 será o suficiente.

Sendo assim, o primeiro passo da aplicação do método simplificado para um limiar adotado entre 0,9 e 0,5 p.u., se dá através da definição e alocação dos monitores nos nós que apresentam caráter obrigatório (nós com a somatória de coluna igual a 1). Feita uma breve análise na matriz apresentada na Tabela 6.6, é possível perceber que o monitoramento será composto somente pelos nós de instalação obrigatória: #1, #3, #5, #6, #9, #14, #15 e #27. Como o artifício aplicado tende a diminuir a área afetada, os nós do sistema se tornam cada vez mais difíceis de serem observados, com menores áreas de vulnerabilidades. Ao retirar as colunas referentes aos nós já observados pelos monitores alocados, observa-se que não existe nenhum nó que não tivesse seu monitoramento garantido.

Tabela 6.8 - Alocação para o sistema de 34 nós com limiares entre 0,9 p.u. e 0,5 p.u. considerando o Método Simplificado.

Nº de monitores	Nós de instalação
8	#1, #3, #5, #6, #9, #14, #15 e #27

6.1.3 Validação da alocação dos MQEEs via o MMC

Apresentados os métodos (via AG e simplificado) e os resultados da alocação dos MQEEs para o sistema em análise, a validação desses conjuntos de respostas foi realizada através de uma simulação pelo MMC. No entanto, sabendo que o tipo de falta mais branda possível foi utilizado como entrada do algoritmo de otimização via o AG, supõe-se que curtos-circuitos de todos os tipos que venham a causar afundamentos de tensão sejam também observados, sem exceção. Ou seja, uma vez garantido o monitoramento dos afundamentos para o caso menos severo, espera-se que o mesmo valha para outros casos.

Com base no cenário apresentado, a validação também se torna mais relevante quando há um aumento proposital na área afetada para diminuir a quantidade de monitores, para que haja uma aferição da eficiência dos monitoramentos quando este é composto por menos monitores que os dados obtidos como resposta.

Assim sendo, o processo de validação foi aplicado ao sistema de 34 nós. O mesmo contém cerca de 93 km de extensão, a taxa de falta por km anual utilizada foi de 55, e o tempo considerado foi de 20 anos. Ao aplicar esses fatores na expressão ilustrada em (6), no item 4.7, a quantidade de curtos-circuitos simulados via o MMC foi de aproximadamente 1.000 eventos. Quando aplicados e relacionados à capacidade de monitoramento do sistema dado pela resposta com menor quantidade de monitor (para a MTC de 0,9 p.u.), foi observado que o mesmo foi capaz de observar todos os mil afundamentos decorrentes das faltas simuladas, sem exceção.

Apesar do MMC não ser aplicado particularmente ao método simplificado, sabe-se que a resposta para alocação dada por esse modo foi idêntico a resposta

dada pela análise via AG, e ainda, que o mesmo também garante a observação dos afundamentos causados por cenários mais brandos (limiar de 0,9 p.u. e outros limiares). Consequentemente, o esquema dado pela simplificação também monitorou todos os cenários de afundamentos simulados

6.2 Sistema de Distribuição de 13 nós

Ao longo da aplicação das metodologias, particularidades foram surgindo de acordo com as diferentes topologias e ajustes foram sendo tomados em sua construção. O sistema de 13 nós é o exemplo mais simples de um alimentador relativamente curto e com baixa tensão nominal. Alguns parâmetros diferentes foram adotados na construção da sua matriz que será utilizada como dado de entrada para o método de otimização via AG e para o método simplificado.

No primeiro passo da aplicação, cinco nós de interesse foram escolhidos ao longo do alimentador para o estudo da sua robustez. Curtos-circuitos de todos os tipos foram realizados e através de uma análise simples sobre as tensões residuais em seus nós, descobriu-se que o distúrbio menos severo estava relacionado com a falta do tipo Monofásica. Vale ressaltar que uma particularidade surge aqui, por ter uma tensão nominal baixa, a resistência de falta não pode assumir nenhum valor além do valor mínimo. Quando o próximo valor teste é adotado, as faltas já não geram mais afundamentos em seus nós. Então o tipo de falta adotado para a construção da matriz foi um curto-circuito franco, monofásico, e, por ser um cenário em que não houve diferença relevante entre qual fase fosse escolhida, convencionou-se a fase B como foco do estudo.

Assim, após aplicação das faltas no sistema, tornou-se possível a construção da MTC apresentada pela Tabela 6.9. Como em todos os casos em análise, esta será construída primeiramente com um limiar de 0,9 p.u., e caso se julgue necessário, novas análises podem ser realizadas para que se estude a influência da área afetada no esquema de alocação dos monitores. A

Tabela 6.10 mostra o simples esquema de alocação composto por somente um monitor e a Figura 6.5 ilustra a localização no alimentador do sistema.

Tabela 6.9 - MTC do sistema de 13 nós com um limiar de 0,9 p.u.

	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
6	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0
7	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1
8	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
9	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Tabela 6.10 - Alocação de MQEES para o sistema de 13 nós para um limiar de 0,9 p.u.

Nº do monitor	Nós de instalação
1	#1

Figura 6.5 - Alocação dos MQEES no sistema de 13 nós.

Como se pode perceber, não seria necessário o uso do AG para o descobrimento da melhor resposta para o caso exposto, pois, com somente um

monitor alocado no nó #1, todos os outros afundamentos causados por faltas francas monofásicas já são capazes de ser monitorados.

O artifício da diminuição da área afetada pela diminuição do limiar adotado pode então ser utilizado. No entanto, para o cenário estudado, diferenças da alocação somente aparecem quando um limiar de 0,5 passa a ser considerado. A Tabela 6.11 expõe a MGC para o caso citado.

Tabela 6.11 - MGC do sistema de 13 nós para um limiar entre 0,9 e 0,5 p.u.

	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11
1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1
2	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
6	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0
7	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1
8	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
9	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Nota-se que, nesse caso, um monitor instalado no nó #1 perde a capacidade de observar os afundamentos quando esse novo limiar é adotado. Caso se esteja utilizando o método simplificado, a resposta do segundo ponto de instalação deverá ser referente ao nó #5. Afinal, após a alocação obrigatória no nó #1, restam duas colunas sem observação: 9 e 10. Assim, excluindo-se todas as colunas com monitoramento garantido, somente os nós #5 e #6 poderiam ser utilizados para monitorar os dois distúrbios ao mesmo tempo, situação na qual a decisão sob escolha estará na redundância das medidas, observadas através dos somatórios das linhas na matriz. A linha referente ao nó #5 tem somatória igual a 7 (sete) e o #6 igual a #3. Desse modo, o esquema resultante de instalação tanto dado pelo AG quanto pelo método simplificado, dão a mesma resposta, sendo este o esquema de menor quantidade de monitores e maior redundância possível.

Tabela 6.12 - Alocação para o sistema de 13 nós para limiares entre 0,9 e 0,5 p.u.

Nº do monitores	Nós de instalação
2	#1 e #5

Figura 6.6 - Alocação dos monitores no sistema de 13 nós dada a MGC de 0,9 a 0,5 p.u.

No tocante à validação das respostas da alocação para o monitoramento dos afundamentos, com ciência de como o tipo de falta foi considerado, não necessariamente se espera que todos os curtos-circuitos simulados pelo MMC sejam observados. Afinal, as faltas foram consideradas francas por não poderem assumir o próximo valor definido para análise (10 Ω).

Respeitando a expressão dada no item 4.6 deste trabalho, sabendo que o comprimento total do sistema de 13 barras é de 2,5 km de rede, utilizando uma taxa de faltas de 55 eventos a cada 100 km de rede, e considerando um tempo de 20 anos, o número médio de eventos nesse período será de 27 ocorrências. No entanto, por não ser uma quantidade elevada de faltas, decidiu-se realizar a validação com um

número de simulações de 100 eventos, aumentado assim, ainda mais a precisão do dado estatístico.

No esquema dado por um limiar fixo de 0,9 p.u., 91% das faltas foram monitoradas, indicando assim a influência na eficiência do sistema de monitoramento quando um monitor é alocado considerando somente faltas francas. Já para o segundo esquema apresentado, considerando um limiar entre 0,9 e 0,5 p.u. com o uso da MGC, 100% dos eventos simulados foram monitorados.

6.3 Sistema de Distribuição de 123 nós

Por terem a mesma tensão nominal, a análise do sistema de 123 nós terá algumas similaridades com a realizada no sistema de 13 nós. A primeira e principal está relacionada com o tipo de falta escolhida para a construção da matriz para o processo de otimização, sendo adotada com curto-circuito franco, uma vez que faltas se tornam irrelevante quando resistências maiores que $10\ \Omega$ são escolhidas para o estudo dos afundamentos de tensão.

Assim, posterior à simulação dos cenários de falta, o passo referente à construção da MTC pode ser tomado. A Tabela 6.13 ilustra a matriz do sistema de uma forma simplificada porque sua ordem é muito grande para a visualização em uma única página (123x123). A Tabela 6.14 expõe a alocação resultante, e a Figura 6.7 ilustra as posições de instalação no alimentador após a aplicação do AG.

Tabela 6.13 - MTC do sistema de 123 nós para um limiar de 0,9 p.u.

Tabela 6.14 - Alocação dos MQEEs para o sistema de 123 nós para o limiar de 0,9 p.u.

Nº de monitores	Nós de instalação
2	#13 e #115

Figura 6.7 - Alocação dos MQEEs no sistema de 123 nós.
Legenda: Preto – Ramos Trifásicos, Verde – Ramos Monofásicos (Fase A), Azul – Ramos monofásicos (Fase B), Vermelho – Ramos Monofásicos (Fase C), Ciano – Ramos Bifásicos (Fases A e B), Laranja – Ramos Bifásicos (Fases A e C).

Como realizado para os outros sistemas, outros limiares serão adotados a fim de explorar diferentes pontos de instalação com alteração da área afetada. No entanto, por não ter uma relevante quantidade de informação e serem de difícil visualização, as MGCs não serão ilustradas para os próximos limites de tensão adotados.

A Tabela 6.15 mostra a alocação dos monitores, e a Figura 6.8 ilustra as posições de instalação dos monitores via a aplicação do AG.

Tabela 6.15 - Alocação para o sistema de 123 nós para os limiares de 0,9 p.u. e 0,8 p.u.

<i>Nº de monitores</i>	<i>Nós de instalação</i>
4	#1, #18, #60 e #115

Figura 6.8 - Alocação dos MQEEs no sistema de 123 nós dada a MGC de 0,9 e 0,8 p.u.

Como se pode observar, os monitores não necessariamente continuam nas mesmas posições. Como também observado para o sistema de 34 nós, alguns monitores perdem observação e são substituídos por outros. Continuando a análise, a Tabela 6.16 mostra o esquema de alocação para monitores com um limiar de 0,9 a 0,7 p.u., e a Figura 6.9 seus locais de instalação quando da aplicação do AG.

Tabela 6.16 - Alocação para o sistema de 123 nós com limiares entre 0,9 p.u. e 0,7 p.u.

Nº de monitores	Nós de instalação
5	#1, #7, #18, #57 e #115

Figura 6.9 - Alocação dos monitores no sistema de 123 nós dada a MGC para limiares entre 0,9 e 0,7 p.u.

A Tabela 6.17 mostra o esquema de alocação para o sistema de 123 barras com a adoção de um limiar de tensão entre 0,9 e 0,6 p.u.. Já a Figura 6.10 ilustra os pontos de instalação dos monitores no alimentador.

Tabela 6.17 - Alocação para o sistema de 123 nós para limiares entre 0,9 p.u. e 0,6 p.u.

Nº de monitores	Nós de instalação
6	#3, #8, #18, #53, #60 e #115

Figura 6.10 - Alocação dos MQEEs no sistema de 123 nós dada a MGC para limiares entre 0,9 e 0,6 p.u.

Do mesmo modo, a Tabela 6.18 mostra a instalação agora para uma faixa de limiares entre 0,9 e 0,5 p.u.. A Figura 6.11 ilustra seus pontos de instalação.

Tabela 6.18 - Alocação dos MQEEs para o sistema de 123 nós com limiares entre 0,9 p.u. e 0,5 p.u.

Nº de monitores	Nós de instalação
11	#1, #3, #8, #9, #13, #18, #57, #60, #76, #97 e #115

Figura 6.11 - Alocação dos MQEEs no sistema de 123 nós dada a MGC para limiares entre 0,9 e 0,5 p.u.

Sobre a aplicação do método simplificado para as MGCs construídas, suas respostas foram idênticas às obtidas pelo AG. Tal fato relevante, pode levantar questões sobre a limitação da aplicabilidade da simplificação para o encontro dos esquemas de alocação. A atual pesquisa não está apta a inferir sobre essa característica, mas entende que possa ser importante para o seu uso e descreve o fato como pontos a serem explorados em trabalhos futuros.

No tocante à validação das alocações apresentadas como soluções para o problema formulado, vale adiantar que os valores estatísticos também se distribuíram de maneira interessante. A quantidade de simulações de curtos-circuitos foi dada pelo

comprimento do alimentador, o qual tem aproximadamente 12 km de linha, levando em consideração o mesmo número de faltas anuais por 100 km de linha e um período de tempo de 20 anos. Em função destes parâmetros, o valor estimado foi de 132 eventos. Mais uma vez, na tentativa de deixar a análise ainda mais representativa, foi empiricamente adotado o número de 300 cenários para esta fase de validação.

A Tabela 6.19 expõe as taxas de eficiência encontradas por cada esquema. Percebe-se que a aproximação das faltas para o tipo monofásico sem resistência de falta (franca) tem grande influência sobre a eficiência da resposta na alocação e é proporcional ao comprimento do alimentador. Quanto maior o alimentador, menor será a eficiência quando aproximado.

Tabela 6.19 – Eficiência estimada da alocação para os diferentes casos adotados

<i>Esquema de alocação (limiar considerado)</i>	<i>Eficiência do esquema</i>
<i>0,9 p.u.</i>	<i>66%</i>
<i>0,9 a 0,8 p.u.</i>	<i>96%</i>
<i>0,9 a 0,7 p.u.</i>	<i>95%</i>
<i>0,9 a 0,6 p.u.</i>	<i>97%</i>
<i>0,9 a 0,5 p.u.</i>	<i>98%</i>

Uma divergência também pode ser observada no valor estatístico da eficiência, no qual deveria haver um aumento no dado quando um limite de 0,7 p.u. é considerado. No entanto, sabendo que a quantidade de cenários simulado não é de ordem elevada, e por serem esquemas com eficiências muito próximas, acredita-se que essa divergência se dê por uma variância do parâmetro estimado em relação a quantidade de amostras.

6.4 Sistema de Distribuição Real

Além de agregar uma aplicação mais próxima à realidade nacional, o sistema de distribuição real também traz um cenário diferenciado, pois sua tensão nominal é distinta das adotadas nos sistemas apresentados até então, e está no meio dos extremos analisados. Com uma um valor de regime permanente de 13,8kV e 89 nós, o alimentador atende cargas industriais e se aproxima muito do cenário que concessionárias pretendem estudar, a fim de melhorar os parâmetros relacionados da QEE.

Assim como aplicado nos sistemas anteriores, o primeiro passo está relacionado com o estudo da máxima resistência de falta que cause um distúrbio na tensão do nó analisado para a construção da MTC. Por ter uma tensão nominal distinta, a resposta para a máxima resistência de falta foi diferente dos outros sistemas. Valores particulares bem distribuídos para a impedância de falta foram adotados ao longo do alimentador. Para os nos nós mais próximos da subestação de energia (nó de referência), uma baixa resistência teve que ser considerada, resultando em curtos-circuitos francos. Para os nós mais distantes, até os valores máximos a serem considerados foram utilizados.

No tocante ao tipo de falta escolhido, alguns nós de interesses foram escolhidos ao longo do alimentador (89 nós) e faltas de todos os tipos foram simuladas a fim de descobrir qual desses teriam menor severidade. Como esperado, a falta foi do tipo monofásica, e, como o sistema foi modelado considerando equilíbrio entre fases, nenhuma delas se sobressaiu na análise.

Após a confecção da MTDF para o tipo de falta escolhido e a construção da MTC para um limiar de 0,9 p.u., o AG foi utilizado para o encontro das melhores localizações para a alocação dos monitores. A Tabela 6.20 ilustra o esquema de alocação encontrado, e a Figura 6.12 ilustra os pontos ao longo do alimentado em escada representativa sobre a distância entre os nós.

Tabela 6.20 - Alocação dos MQEEs para o sistema de distribuição real nós para um limiar de 0,9 p.u.

Nº de monitores	Nós de instalação
11	#1, #3, #5, #6, #17, #18, #20, #21, #24, #31 e #37

Figura 6.12 – Alocação dos MQEEs no sistema de distribuição real para um limiar de 0,9 p.u.

Mais uma vez, quando comparado ao método simplificado, as respostas do AG foram similares. Percebe-se que há uma certa robustez associada a metodologia simplificada quando dados de entrada a serem considerados seguem as sugestões dessa pesquisa.

Como discutido do item 4.4.7 do presente documento, por ser demasiadamente criterioso na escolha do tipo e resistência de falta, o método pode influenciar a alocação dos monitores de maneira não positiva, colocando um número relativamente alto de monitores em relação a intenção de investimento inicial da concessionária. Sabendo da necessidade e intenção de um investimento menor no monitoramento, o artifício discutido no item 4.4.7, será utilizado no presente sistema analisado.

O processo consiste em diminuir as resistências de falta na construção da MTDF para que a área afetada seja maior e menos monitores sejam necessários para a observação de todos os afundamentos de tensão.

A Tabela 6.21 apresenta a alocação realizado quando as resistência de falta consideradas são diminuídas em 5 Ω . As que tinham valor 0 (zero), continuaram com o mesmo valor. A Figura 6.13 ilustra o mesmo esquema ao longo do alimentador. Percebe-se que a quantidade de monitores diminuiu, e o quanto a diminuição, esta influenciou na eficiência do sistema de monitoramento, que será discutido a seguir pela aplicação do MMC.

Tabela 6.21 - Alocação dos MQEEs para o sistema de distribuição real com resistências de faltas diminuídas em 5 Ω .

Nº de monitores	Nós de instalação
7	#1, #5, #6, #17, #18, #20 e #37

A caráter informativo, pela análise, continuou-se diminuindo as resistências de falta para inferência da sensibilidade do sistema em estudo. Dessa vez, as resistências foram diminuídas em 10 Ω . A Tabela 6.22 apresenta este novo cenário de alocação dos equipamentos. A ilustração dos monitores ao longo do alimentador será dado pela Figura 6.14.

Figura 6.13 - Alocação dos MQEEs no sistema de distribuição real dada a MTC com resistências de falta diminuídas em 5Ω .

Tabela 6.22 – Alocação para o sistema de distribuição real com as resistências de faltas diminuídas em 10Ω .

Nº de monitores	Nós de instalação
4	#1, #3, #5 e #6

Figura 6.14 - Alocação dos MQEEs no sistema de distribuição real dada a MTC com resistências de falta diminuídas em 10Ω .

Como o aumento da área afetada geralmente facilita o encontro das localizações dos pontos para a garantia do monitoramento dos afundamentos, as respostas obtidas quando o artifício foi utilizado ainda foram similares aos esquemas de alocação encontrados pelo método simplificado.

Discorrendo em específico da validação das respostas obtidas através dos dois métodos, as simulações via o MMC foram também aplicadas a fim de estimar o impacto sobre a eficiência do monitoramento quando esses passos de reorganização dos dados de entrada são tomados. Sabendo que a distância total do alimentador é de 15,6 km, e, considerando os parâmetros para a obtenção da quantidade de cenários simulados como igual aos outros sistemas analisados, 300 eventos foram obtidos para a simulação para um período de 20 anos. Assim como para o sistema de 123 nós, esse número será extrapolado visando um aumento na assertividade sobre

a estatística. Para o presente sistema, um número de 500 curtos-circuitos foram adotados.

Como a primeira situação contempla o tipo de falta menos severo possível, e o máximo valor para sua resistência, 100% dos afundamentos simulados foram monitorados pelos equipamentos. Para o segundo cenário, mesmo diminuindo a resistência de falta, todos os cenários de falta ainda foram observados pelos monitores. No entanto, no terceiro cenário houve uma retração, observando um total de 93% dos casos simulados.

Nota-se que a alocação dos monitores diferentes dos que foram alocados próximos a subestação provavelmente são frutos da exigência do monitoramento de todos os afundamentos, mesmo os mais brandos no final do alimentador. No entanto, por mais que sejam necessários, estes não influem de maneira tão decisiva na eficiência do monitoramento frente aos afundamentos evidenciados.

7 Conclusões

Seja pela intenção do aumento da qualidade do produto fornecido, ou por adequações às novas exigências provindas dos órgãos reguladores, a qualidade da energia elétrica é um recorrente assunto cada vez mais presente no cenário das concessionárias e empresas relacionadas ao setor de energia elétrica. A principal razão está relacionada à crescente presença de cargas mais sensíveis a distúrbios na tensão de fornecimento, uma vez que essas podem gerar graves prejuízos aos grandes consumidores finais.

Adicionalmente, normas e procedimentos para a distribuição da energia têm se tornado cada vez mais rígidos. Quadro este que demonstra não mudar de sentido visto documentos como o PRODIST, no qual entende-se que os parâmetros que indicam uma boa qualidade da energia elétrica precisam ser melhorados. Sabendo disso, empresas responsáveis pela distribuição de energia direcionam mais investimentos às áreas de pesquisa e desenvolvimento que têm como objetivo analisar, registrar e solucionar problemas relacionados à QEE em SDs.

Com ciência de que um bom sistema de monitoramento de distúrbios é um dos primeiros passos para se garantir boa qualidade do produto fornecido, que muitas concessionárias no Brasil ainda não contemplam tais sistemas e estratégias para sua construção, o presente trabalho, na tentativa de contribuir para tal cenário, apresentou dois métodos para a alocação de monitores de qualidade da energia elétrica. Na abordagem realizada, o principal objetivo considerado nos esquemas de instalação dos equipamentos está relacionado ao monitoramento das VTCDs, uma vez que estes distúrbios em específico são os causadores de maiores danos financeiros ao nível industrial.

Na aplicação das metodologias, sugestões para modificações na construção dos dados de entrada do método de otimização são dadas com intenção de contribuir no estudo para encontrar boas localizações para a instalação dos monitores.

Inspirada em trabalhos da literatura correlata, a presente pesquisa utiliza a aplicação de um método inteligente de otimização como ferramenta para o encontro

das soluções. Um algoritmo genético foi modelado de maneira simples e eficiente frente ao problema exposto.

A tentativa de cooperação para o estudo da alocação otimizada também foi realizada através de um método simplificado de redução do espaço de busca combinada com as alterações dos dados de entrada para facilitar o encontro de respostas para o dado problema.

O método simplificado se mostrou útil, muitas vezes dando a mesma resposta do que o AG utilizado para o encontro das soluções. Entretanto, o presente trabalho ainda não consegue inferir de maneira eficaz sobre suas limitações em diferentes situações ou quando sistemas muito maiores forem utilizados. Ainda assim, suas respostas foram validadas através de um método estatístico dado pelo MMC no qual vários cenários aleatórios de distúrbios foram gerados a fim de validar a eficiência dos esquemas de alocação adotados.

A eficiência das respostas dos esquemas de alocação frente ao seu principal objetivo, monitorar as VTCDs causadas por curtos-circuitos nas linhas de distribuição, se mostrou eficaz e robusto quando considerado distintos cenários e problemas, dados pelos sistemas exemplos expostos.

A presente pesquisa, como qualquer outra que tenha a intenção de contribuir com o assunto proposto através de novos caminhos, tem muito espaço para ajustes, refinamentos e adequações para que se avalie mais objetivos relacionados a parâmetros de QEE, encaixando-se melhor em um cenário que dependerá de uma comunicação *on-line* com a subestação de energia, seus meios de transmissão e tratamento de dados, e, ao mesmo tempo, que trabalhe na possibilidade de suporte para problemas já existentes, como a localização de faltas ao longo do alimentador.

Vale registrar que no decorrer do desenvolvimento e adequação de uma metodologia genérica para a alocação de monitores de qualidade da energia, certos obstáculos, situações específicas e possíveis potenciais de evolução dos dois métodos apresentados foram notados. Alguns desses serão expostos no presente capítulo com a intenção de que se dê continuidade à pesquisa iniciada.

Dentre os pontos, estão:

- A possibilidade de uma ação conjunta dos métodos apresentados com uma metodologia para a localização das situações de faltas;
- O estudo da limitação do método simplificado frente à sistemas de maior ordem;
- A inserção de outros objetivos relacionados à QEE na aplicação do processo de otimização da alocação dos monitores, como, por exemplo, o monitoramento de harmônicos nocivos na rede;
- Estudo sobre a melhor maneira de construir os dados de entrada para o método de otimização, uma vez que parâmetros como o tipo de curto-circuito adotado, resistência de falta e a topologia do sistema estudado são tão relevantes, como apresentado;
- A construção de uma melhor função de avaliação dos indivíduos que formam a população evolutiva no algoritmo genético, voltada para objetivos específicos do monitoramento de parâmetros de QEE;
- Estudo sobre a influência da geração distribuída na rede sobre os métodos propostos;
- A generalização da metodologia para alocação otimizada em sistemas elétricos que contemplem a capacidade de reconfiguração de redes; e
- Aprimoramento dos métodos propostos para uma aplicação generalizada tanto em sistemas malhados quanto radiais.

Para finalizar, cabe colocar que desde o início do estudo do problema de otimização da alocação de MQEEs em SDs, as conclusões marginais evidenciadas foram devidamente registradas e apresentadas em forma de dois artigos técnico-científicos.

O primeiro artigo foi submetido e apresentado na conferência internacional IEEE INDUSCON 2014 (*International Conference on Industry Applications*) com o título de “*Alocação de Medidores de Qualidade da Energia Elétrica Através da Inspeção Visual para Observação de Variações de Tensão de Curta Duração*”. Este

trabalho relata as primeiras inferências a fim de se construir uma metodologia simplificada para a alocação nos monitores.

O segundo trabalho foi submetido e apresentado na conferência internacional ICREPQ (International Conference On Renewable Energies and Power Quality), sob o título de “*A Generalized Coverage Matrix Method for Power Quality Monitor Allocation Utilizing Genetic Algorithm*”. Neste, o trabalho já trata em específico da alocação do monitores via AGs utilizando a matriz generalizada de cobertura.

8 Referências Bibliográficas

ALMEIDA, C. F. M.; KAGAN, N. Allocation of Power Quality Monitors by Genetic Algorithms and Fuzzy Sets Theory. **Intelligent System Applications to Power Systems, 2009. ISAP '09. 15th International Conference on**, Curitiba, 8-12 Nov. de 2009, p. 1 – 6.

ALMEIDA, C. F. M.; KAGAN, N. Genetic Algorithms applied for the Optimal Allocation of Power Quality Monitors in Distribution Networks. **Proceedings of 14th International Conference on Harmonics and Quality of Power – ICHQP**, Bergamo, 26-29 Sep. de 2010, p 1 – 10.

ANEEL. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST**. ANEEL. Resolução Normativa nº 345/2008, p. 76. 2006.

BUCCI, G.; LANDI, C. A distributed measurement architecture for industrial applications. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement** , vol. 52, 02 Abr. de 2003, p. 165-174.

CEBRIAN A., J. C. Metodologias para avaliação de riscos e dos custos de interrupções em processos causados por faltas em sistemas de distribuição de energia elétrica. **Tese de Doutorado**, São Paulo, 18 Junho de 2008, p. 191.

CEBRIAN, J. C.; ALMEIDA, C. F. M.; KAGAN, N. Genetic algorithms applied for the optimal allocation of power quality monitors in distribution networks. **Proceedings of 14th International Conference on Harmonics and Quality of Power - ICHQP 2010**, Bergamo, 26-29 Set. de 2010, p. 1-10.

CHANG, G. W. A new procedure for tracking the source location of voltage sags. **Power Engineering Society General Meeting, IEEE.** , 1-4 Jun de 2007.

CHANG, G. W.; RANADE, S; WATSON, N. R.; BOLLEN, M. H. J. Monitoring issues and analysis techniques - smart grid aspect of power quality. **978-1-4673-1943-0/12/\$31.00 ©2012 IEEE.**

CHO, K.-S.; SHIN, J.-R.; HYUN, S. H. Optimal placement of phasor measurement units with GPS receiver. **Power Engineering Society Winter Meeting, 2001. IEEE**, Columbus, 28 Jan. de 2001, p. 258-262.

CHUNG, I. Y. WON, D. J.; KIM, J. M.; AHN, S. J.; MOON, S. I. Development of a network-based power quality diagnosis system. **ELSEVIER Electric Power Systems Research**, vol. 77, Set. De 2007, p. 1086-1094.

CHUNG, I.-Y.; WON, D.-J.; AHN, S.-J.; KIM, J.-M.; MOON, S.-I.; SEO, J.-C. Development of new power quality management system with power quality diagnosis functions. **J. Electr. Eng. & Technol.**, vol. 1, no. 1, Mar. de 2006, p. 28-34.

ECKHARDT, R. Stan Ulam, John von Neumann, and the Monte Carlo method. **Los Alamos Science Special Issue**, Los alamos, n. 15, p. 131-137, 1987.

FARQUI, T. C. Afundamentos de tensão em indústrias de papel e celulose. **Dissertação de Mestrado**, Escola politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

GARCÍA-MARTÍNEZ, S.; ESPINOSA-JUÁREZ, E.; HERNÁNDEZ, A. Analysis of system operation state influence on the optimal location of voltage sag monitors by applying tabu search. **North American Power Symposium (NAPS)**, Arlington, 26-28 Set. de 2010, p. 1-6.

GOLDBERG, D. E. Computer-aided gas pipeline operation using genetic algorithms and rule learning. **Tese de Doutorado**, University of Michigan, 1983.

HAUPT, R. L.; HAUPT, S. E. **Practical Genetic Algorithms**. 2. ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., v. 1, 2004.

HOCHBAUN, D. S. **Approximation Algorithms for NP-Hard Problems**. PWS Publishing Company, 1995.

HØIDALEN, H. K. ATPDraw - The graphical preprocessor do ATP Electromagnetic Transients Program. **ATPDraw**, 2012. Disponível em: <<http://www.atpdraw.net/>>. Acesso em: Fev. de 2016.

HOLLAND, J. Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence. U Michigan Press, 1975.

IBRAHIM, A. A.; MOHAMED, A.; SHAREEF, H.; GHOSHAL, S. P. Optimal placement of voltage sag monitors based on monitor reach area and sag severity index. **Research and Development (SCORED), IEEE Student Conference**, Putrajaya, 13-14 Dez. de 2010, p. 467 - 470.

IBRAHIM, A. A.; MOHAMED, A.; SHAREEF, H.; GHOSHAL, S. P. Optimal power quality monitor placement in power systems based on particle swarm optimization and artificial immune system. **Data Mining and Optimization (DMO). IEEE.**, Putrajaya, 28-29 Jun. de 2011, p. 141-145.

IBRAHIM, A. A.; MOHAMED, A.; SHAREEF, H. Optimal placement of power quality monitors in distribution systems using the topological monitor reach area. **Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)**, Niagara Falls, ON, 15-18 Mai. De 2011, p. 6.

IEEE-PES. Distribution Test Feeders. **IEEE-PES Power & Energy Society**, 2000-2010. Disponível em: <<https://ewh.ieee.org/soc/pes/dsacom/testfeeders/>>. Acesso em: Fev. de 2016.

KEMPNER, T. R. A. Robustez de um Sistema de Distribuição e a Alocação de Medidores de Qualidade de Energia Elétrica Frente aos Afundamentos de Tensão. **Dissertação de Mestrado**, São Carlos, Mar. de 2012, p. 111.

KIZILCAY, M. Alternative Transients Program. **EMTP**, 2015. Disponível em: <<http://www.emtp.org/>>. Acesso em: Fev. de 2016.

KOUTSOUKIS, N.C.; MANOUSAKIS, N.M.; GEORGILAKIS, P.S.; KORRES, G.N. Numerical observability method for optimal phasor measurement units placement using recursive Tabu search method. **Generation, Transmission & Distribution, IET**, Abr. de 2013, p. 347-356.

LINDEN, R. **Algoritmos Genéticos** -. 3a. ed. Ciência Moderna, v. I, 2012.

MATHWORKS. MATLAB - MathWorks, 1994-2016. Disponível em: <<http://www.mathworks.com/products/matlab/>>. Acesso em: Fev. de 2016.

MATZ, V.; RADIL, T.; RAMOS, P.; SERRA, A.C. Automated Power Quality Monitoring System for on-line detection and classification of disturbances. **Instrumental and Measurement Technology Conference (IMTC)**, Warsaw, Poland, 1-3 Mai. de 2007.

METROPOLIS, N. The Beginning of the Monte Carlo Method. **Los Alamos Science Special Issue**, Los Alamos, n. 15, p. 125-130, 1987.

NEMHAUSER, G.; WOLSEY, L. **Integer and combinatorial optimization**. John Wiley, 1988.

NETO-TONELLI, M. S.; DECANINI, J. G. M. S.; MINUSSI, C. R. Detecção e classificação de faltas de curto-circuito em sistemas de distribuição de energia elétrica usando uma rede neural ARTMAP fuzzy. **X SBAI - Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente**, 18-21 Dez. de 2011.

OLESKOVICZ, M.; BRANCO, H.M.G.C.; DA SILVA, R.P.M.; COURRY, D.V. A Compact Genetic Algorithm structure used for the optimum allocation of power quality monitors based on electrical circuit topology. **Harmonics and Quality of Power (ICHQP)**, Hong Kong, 17-20 Jun. de 2012, p. 34-39.

OLGUIN, G.; BOLLEN, M. H. J. Optimal dips monitoring program for characterization of transmission system. **Proceedings of IEEE/PES General Meeting**, Jul. de 2003, p. 13-17.

PEREIRA, R. A. F.; DA SILVA, L. G. W.; MANTOVANI, J. R. S. PMUs optimized allocation using a tabu search algorithm for fault location in electric power distribution system. **Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America, 2004 IEEE/PES**, 8-11 Nov. de 2004, p. 143-148.

REIS, D. C. S. Alocação de monitores de qualidade de energia e unidades de medição fasorial usando programação dinâmica aproximada. **Tese de Doutorado**, Rio de Janeiro, Abr de 2012, p. 96.

SANTOS, R. F. S.; SILVA, S. R. Sensibilidade de controlador lógico programável frente a afundamentos de tensão. **V Seminário brasileiro sobre qualidade de energia**, Aracaju - SE, 2003.

SHORT, T. A. **Electric Power Distribution Handbook**. 2°. ed. CRC Press, v. I, 2014.

SOLVERS, F. "Monte Carlo Simulation Tutorial", 2015. Disponível em: <http://solver.com/monte-carlo-simulation-overview#What_is_Monte_Carlo_Simulation>.

WEI, Z. N.; WU, S.; SUN, G. Q.; TANG, L. F.; WANG, C. Optimal placement of power quality monitors based on multi-objective evolutionary algorithm. **J. Power System Technology**, vol. 36, no. 1, Jan. de 2012, p. 176-181.

WEG. DT-6 – Motores elétricos assíncronos e síncronos de média tensão – especificação, características e manutenção. **Manual WEG**, Ed 1, Rev 3.07, 2015.

WON, D.; CHUNG, I.; J., KIM; S., MOON. Development of power quality monitoring system with central processing scheme. **Power Engineering Society Summer Meeting, 2002 IEEE (vol. 2)**, Chicago, IL, USA, 25 Jul. de 2002, p. 915 - 919.

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 Trans. Power Del.**, , Vol. 21, No. 3, Jul de 2006, p. 1641-1647.

WON, D.-J.; MOON, S.-I. Optimal Number and Locations of Power Quality Monitors Considering System Topology. **IEEE Transactions on Power Delivery** , Vol. 23, 26 Jan. de 2008, p. 288-295.

XIE, Z.; YU, Z.; WENG, G.; WANG, Q. Research on allocation optimization for power quality monitors in smart distribution grid. **Power System Technology (POWERCON), 2014 International Conference**, Chengdu, 20-22 Out. de 2014, p. 2252 - 2259.